

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Bakalářská práce

Analýza metod používaných v metrologii

Touš Matyáš

© 2024/2025 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Matyáš Touš

Inženýrství údržby

Název práce

Analýza metod používaných v metrologii

Název anglicky

Analysis of the methods used in metrology

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o metodách používaných v metrologii. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky bakalář stanoví přínos práce.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíle práce a metody jejího vypracování.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

měření, povrch, drsnost, tolerance, etalon, technické veličiny

Doporučené zdroje informací

ALLEN, T.: Particle Size Measurement. Vol. 2, Surface area and pore size determination. London, 1997.

CHRISTOPH, R., NEUMANN, J., H.: Multisenzorová souřadnicová měřicí technika, měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti, Uherské Hradiště, PRIMA Bilavčík, 2008.

KOMEG eco-fix: souřadnicové měřicí stroje, Teplice, Mitutoyo Česko, 2012.

Měření drsnosti povrchu. Teplice, Mitutoyo Česko, 2011.

PC-DMIS: software pro souřadnicové měřicí stroje, Hexagon Metrology, Praha, 2010.

THOMAS TOM, R.: Rough Surfaces. Imperial College Press, 2014.

Vědecká literatura: Journal of Materials Processing Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojírenská technologie, Journal of materials science, Manufacturing technology.

Předběžný termín obhajoby

2024/2025 LS – TF

Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 29. 12. 2023

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 01. 03. 2024

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 13. 01. 2025

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Analýza metod používaných v metrologii" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2025

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, doktoru Petru Hraběti, za jeho podporu a vedení během psaní mé práce. Velmi si cením jeho profesionálního přístupu, trpělivosti a rychlých odpovědí na mé dotazy, které mi velmi pomohly při formálním zpracování práce.

Analýza metod používaných v metrologii

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na komplexní analýzu metod používaných v metrologii se zvláštním důrazem na moderní přístupy k měření. Práce detailně rozebírá principy ručních metod měření, jako jsou mikrometry a posuvná měřítka, přičemž klade důraz na konstrukční řešení, vlivy měřicích podmínek a zásady správného používání těchto nástrojů. Dále je představen přehled strojních metod měření, zejména prostřednictvím souřadnicových měřicích strojů (CMM) a výpočetní tomografie (CT), které umožňují získávání přesných trojrozměrných dat. Práce se rovněž věnuje metodám měření povrchu, stanovování drsnosti a kalibraci pomocí etalonů, přičemž jsou analyzovány faktory ovlivňující přesnost a opakovatelnost výsledků. Výsledkem je ucelený přehled současných měřicích metod, jejich výhod a omezení a návrh možných směrů dalšího rozvoje v oblasti metrologie.

Klíčová slova: měření, povrch, drsnost, etalon, tomografie, metody měření, nejistoty, chyby měření, měřicí stroje

Analysis of the methods used in metrology

Abstract

This bachelor thesis focuses on a comprehensive analysis of the methods used in metrology with a special emphasis on modern approaches to measurement. The thesis discusses in detail the principles of hand-held measurement methods such as micrometers and calipers, emphasizing the design, the effects of measurement conditions, and the principles of proper use of these instruments. It also presents an overview of machine-based measurement methods, particularly coordinate measuring machines (CMM) and computed tomography (CT), which allow the acquisition of accurate three-dimensional data. The paper also discusses methods of surface measurement, roughness determination and calibration using standards, analysing the factors affecting the accuracy and repeatability of the results. The result is a comprehensive overview of current measurement methods, their advantages and limitations, and a proposal of possible directions for further development in the field of metrology.

Keywords: measurement, surface, roughness, etalon, tomography, measurement methods, uncertainties, measurement errors, measuring machines

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Cíl práce.....	2
1.2 Metodika	2
2 První metody měření.....	3
2.1 Starověké počátky.....	3
2.2 České počátky	3
2.3 Průmyslová revoluce	3
2.4 Moderní historie	4
2.5 Shrnutí vývoje.....	4
3 Ruční měření délkových rozměrů	5
3.1 Třmenový mikrometr.....	5
3.1.1 Konstrukce a princip	6
3.1.2 Elementy ovlivňující měření	8
3.1.2.1 Vliv změny metody uchycení a orientace	8
3.1.2.2 Roztažnost mikrometru v důsledku držení holou rukou	9
3.1.2.3 Abbého princip.....	10
3.1.3 Desatero používání mikrometru	10
3.1.4 Atypické mikrometry	12
3.1.4.1 S odlišnou konstrukcí.....	12
3.1.4.2 Se speciálními dotyky	13
3.2 Posuvné měřítko	14
3.2.1 Konstrukce a princip	14
3.2.2 Elementy ovlivňující měření	16
3.2.2.1 Abbého princip.....	16
3.2.2.2 Teplota	16
3.2.3 Atypická posuvná měřítka.....	17
3.2.3.1 Měření vnitřních rozměrů	17
3.2.3.2 Speciální čelisti	19
4 Strojní měření rozměrů.....	20
4.1 Souřadnicový měřicí stroj (CMM)	20
4.1.1 Princip fungování	20
4.1.2 Rozdělení dle měřicí metody.....	20
4.1.2.1 Kontaktní měření	20
4.1.2.2 Výhody.....	21

4.1.2.3	Nevýhody	21
4.1.2.4	Optické (bezkontaktní) měření	21
4.1.2.5	Výhody.....	21
4.1.2.6	Nevýhody	21
4.1.3	Srovnání výhod a nevýhod	22
4.1.4	Technické aspekty a kalibrace.....	22
4.1.5	FIVE U-nique	22
4.1.6	Rozdělení dle konstrukce	24
4.1.6.1	Měřicí mikroskopy a projektory	24
4.1.6.2	SMS s křížovým stolem	24
4.1.6.3	SMS s portálem.....	24
4.1.7	Senzory.....	25
4.1.7.1	Vizuální senzory	26
4.1.7.2	Senzory měřící vzdálenost	26
4.1.7.3	Dotykové senzory	26
4.2	Výpočetní tomografie (CT)	27
4.2.1	Princip rentgenové tomografie	27
4.2.2	Získání rozměrů z rentgenových snímků	28
4.2.2.1	příprava dat před jejich zpracováním.....	29
4.2.2.2	Filtrace	30
4.2.2.3	Zpětné promítání	30
4.2.3	Zlepšení využití CT	31
4.3	Porovnání mezi CMM a CT	31
5	Měření Povrchu	32
5.1	Metody měření drsnosti	32
5.2	Kontaktní měření povrchu	32
5.2.1	Vliv drsnosti povrchu při použití mechanické sondy.....	34
5.3	Bezkontaktní měření povrchu.....	35
5.3.1	Interferometrie.....	35
5.3.1.1	Interference	36
5.3.2	Konfokální technologie	37
5.3.3	Ai Focus Variation	37
5.3.4	Vliv drsnosti povrchu při optických a laserových metodách	37
6	Etalony	38
6.1	Klasifikace etalonů	38
6.2	Problematika etalonů	38

7 Přesnost měření.....	39
7.1 Nejistoty měření	39
7.2 Chyby měření	39
8 Budoucnost metrologie.....	41
9 Závěr.....	42
10 Seznam použitých zdrojů.....	44

Seznam obrázků

Obr. 1 Prodlužovací prvky mikrometru [4].....	6
Obr. 2 Konstrukce mikrometru [5].....	7
Obr. 3 Metody uchycení a jejich efekt [7]	8
Obr. 4 Roztažnost mikrometru vlivem držení rukou [7]	9
Obr. 5 Abbého chyba [7].....	10
Obr. 6 Upevnění mikrometru [7].....	11
Obr. 7 Mikrometrický hloubkoměr [4]	12
Obr. 8 Bench micrometr [4]	12
Obr. 9 Modulární mikrometr [4]	13
Obr. 10 Speciální dotyky mikrometru [4]	14
Obr. 11 Prizmatické dotyky mikrometru [7]	14
Obr. 12 Nonická stupnice [5]	15
Obr. 13 Konstrukce posuvného měřítka [8]	15
Obr. 14 Abbého princip posuvného měřítka [7].....	16
Obr. 15 Měrky vnitřních bodů [4]	17
Obr. 16 Nožové měrky vnitřní [4].....	17
Obr. 17 Ploché vnitřní čelisti [4].....	17
Obr. 18 Hroty pro měření drážek [4].....	18
Obr. 19 Posuvná měrka na měření závitů [4]	19
Obr. 20 Posuvná měrka pro měření tloušťky trubek [4]	19
Obr. 21 Čelisti pro měření vzdálenosti děr [4]	19
Obr. 22 HEXAGON FIVE U-nique [13]	23
Obr. 23 Konstrukce CMM [10].....	25
Obr. 24 Zvětšení měřeného objektu [15]	28
Obr. 25 Voxel [17]	29
Obr. 26 Kombinace vlnových délek [30]	36

Seznam použitých zkratk

CMM.....	Coordinate Measuring Machine (Souřadnicový měřicí stroj)
CT.....	Computed Tomography (Výpočtová tomografie)
SI.....	Système International d'Unités (Mezinárodní soustava jednotek)
CLA.....	Chromatic Length Aberration (Chromatická aberace délky)
CCD.....	Charge-Coupled Device (S vázanými náboji)

1 Úvod

Měření představuje nezbytný nástroj pro zajištění jakosti, přesnosti a spolehlivosti ve výrobních i kontrolních procesech. Tato práce si klade za cíl analyzovat metrologické metody používané v praxi, se zaměřením na ruční a strojní přístupy, a ukázat, jak jejich správné využití přispívá k dosahování vysoké měřicí přesnosti. V textu jsou představeny různé techniky měření, které nacházejí uplatnění při kontrole geometrie dílů, určení rozměrů i charakterizaci povrchových vlastností.

V první části se práce soustředí na ruční měření délkových rozměrů, kde jsou popsány principy fungování mikrometrů a posuvných měřitek. Zvláštní pozornost je věnována konstrukčním řešením těchto zařízení, jako je použití mikrometrického závitu, nonické stupnice či mechanismů pro vymezení konstantní měřicí síly. Důkladná analýza faktorů ovlivňujících měření, například vlivu teploty nebo způsobu uchycení přístroje, ukazuje, jak mohou i drobné odchylky ovlivnit výslednou přesnost. Důsledné dodržování doporučených pracovních postupů a pravidel je proto nezbytné pro zajištění spolehlivých měřicích dat.

Další část práce se věnuje strojním metodám měření, kde jsou detailně popsány souřadnicové měřicí stroje (CMM) a výpočetní tomografie (CT). Tyto technologie umožňují automatizované a velmi přesné měření složitých geometrických útvarů dílů a tím jsou vhodné do sériové výroby. Popis principu fungování CMM zahrnuje jak kontaktní, tak bezkontaktní metody měření, přičemž se zdůrazňuje význam správné kalibrace a údržby měřicích zařízení. Výpočetní tomografie jako metoda využívající rentgenové paprsky představuje moderní přístup k získávání trojrozměrných dat, který je využitelný zejména při kontrole vnitřních struktur dílů. Obě metody jsou porovnávány z hlediska přesnosti, rychlosti měření a specifických podmínek, za kterých je jejich použití optimální.

Kromě měření geometrických parametrů se práce zabývá i problematikou měření povrchu, zejména analýzou drsnosti, která je klíčová pro stanovení jakostních parametrů výrobků. Diskutovány jsou metody kontaktního i bezkontaktního měření, přičemž je zdůrazněna role etalonů a kalibračních postupů pro minimalizaci měřicích nejistot.

Cílem této práce je poskytnout ucelený přehled o moderních metrologických metodách, ukázat jejich principy, výhody a omezení a identifikovat klíčové faktory ovlivňující přesnost měření. Tento přístup umožňuje optimalizovat měřicí procesy a přispívá k dalšímu rozvoji metrologie v kontextu současných technologických požadavků.

1.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je systematicky shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o metodách používaných v metrologii. První část práce se věnuje historickému vývoji měření, kde jsou popsány primitivní metody a přechod k moderním měřicím standardům, včetně zavedení mezinárodních systémů, jako je soustava SI. Následně jsou v další části rozebrány technické aspekty jednotlivých měřicích metod, jejich přesnost, reprodukovatelnost a postupy kalibrace, které zajišťují spolehlivost výsledků. Dále se práce zaměřuje na problematiku vyhodnocování nejistoty měření a identifikaci zdrojů chyb, což je klíčové pro správnou interpretaci získaných dat. Závěrečná část obsahuje kritické zhodnocení současného stavu metrologických metod a navrhuje možnosti technologických inovací, které by mohly dále zvýšit efektivitu a přesnost měření.

1.2 Metodika

Práce spočívala v systematickém sběru informací z online databází a tištěné literatury získané z univerzitních knihoven. Nejprve byla definována klíčová slova pro vyhledávání relevantních vědeckých článků a odborných publikací. Následně byly získané zdroje kriticky vyhodnoceny, syntetizovány a kategorizovány podle typu měřicích metod. Každý použitý zdroj byl řádně citován, aby byla zaručena ověřitelnost informací. Tento přístup zajistil komplexní a objektivní přehled o moderních metrologických metodách.

2 První metody měření

Než můžeme měřit, musíme si nejprve zvolit jednotku, ke které budeme porovnávat měřený prvek. Již před 4000 lety si různé civilizace (například starověká Čína, Indie, Egypt či Mezopotámie) vytvořily své vlastní měřicí systémy, které byly nezbytné především pro rozvoj směnného obchodu. [1, 2]

2.1 Starověké počátky

První míry vychází nejčastěji z částí lidského těla nebo běžně dostupných objektů jako mohou být různá zrna nebo kameny. Například egyptský královský loket (asi 0,525 m) byl odvozen od délky předloktí faraona. Pro měření váhy se používal deben (přibližně 91 g) a u delikátnějších měření vzácných materiálů se využívalo pšeničné či chlebovníkové zrna. Takové metody měly tu výhodu, že jsou vždy po ruce, ale jejich nevýhodou byla nekonzistentnost a nedostatek jednotnosti. Z toho vyplývalo zavádění standardních měr, kdy například v Babylónu byly v chrámech umístěny kameny sloužící jako primitivní etalony, aby se ověřovala správnost obchodních měření. [1, 2]

2.2 České počátky

V českých zemích sehrál klíčovou roli Přemysl Otakar II., který v roce 1268 zavedl pražský (český) loket jako standardní jednotku délky. Tento loket byl základem pro další jednotky, jako je píd' ($1/3$ loktu) nebo prst (šířka čtyř ječných zrn). Dochovaným důkazem je železný pražský loket, který od roku 1760 visí na Novoměstské radnici. V tehdejší době tuto míru spravoval městský zřízenec, který na vyžádání donesl schůdky a za poplatek mohl kontrolovat správné měření prodejců. [1, 3]

2.3 Průmyslová revoluce

Se vzestupem průmyslové revoluce v 18. století sílila potřeba přesného a univerzálního měření, zejména pro vědecké a obchodní účely. Přírodovědci a ostatní aktéři průmyslové revoluce si uvědomovali, že budou potřebovat spolehlivé metody měření. Významný krok k vytvoření jednotného měrového systému podnikla Francie, kde v roce 1790 navrhl poslanec politika Charlese Maurice de Talleyrand-Périgord zavedení nové jednotky délky. Na základě tohoto návrhu francouzské Ústavodárné národní shromáždění sestavilo vědeckou komisi, která dostala za úkol stanovit srozumitelný a stálý systém měrových

jednotek. Výsledkem komise se v roce 1791 stala metrická soustava, kde byl základní člen metr jakožto jednotka délky a spolu s ním desetinová soustava (která umožnila jednoduché přepočítávání mezi jednotkami). Tyto dva elementy jsou základními pilíři metrické soustavy. Tato nová jednotka délky byla definována jako jedna desetimiliontina zemského kvadrantu procházejícího Paříží, vztaženého na hladinu moře. Triangulační měření byla uskutečněna mezi lety 1792 až 1798. Druhou základní jednotkou metrické soustavy se stal kilogram, původně definovaný jako hmotnost jednoho litru čisté odvdzdušněné vody při teplotě 4 °C (při nejvyšší hustotě vody). [1, 2]

Po ověření tohoto nového systému ve Francii se 25. května roku 1875 v Paříži konala první mezinárodní dohoda o metrickém systému, takzvaná Metrická konvence (Convention du Mètre). Podepsalo ji tehdy 18 zemí tehdejší Evropy a Ameriky včetně Rakouska-Uherska, které na našem území bylo ve správě měř a vah velmi pokročilé. Po vzniku ČSR jsme se stali signatářem roku 1922. [1, 2]

2.4 Moderní historie

V moderní době vyvrcholila potřeba přesného měření na XI. Generální konferenci pro míry a váhy v roce 1960, kde byla přijata Mezinárodní soustava jednotek SI (Système International d'Unités). Ta se původně skládala ze šesti základních jednotek (délky, hmotnosti, času, teploty, elektrického proudu a svítivosti) a dvou doplňkových jednotek (radián a steradián). Sedmá základní jednotka látkového množství (mol) byla dodatečně přidána až v roce 1971. [1, 2]

2.5 Shrnutí vývoje

Historie měření ukazuje dlouhý vývoj od jednoduchých metod, kdy se délky měřily částmi lidského těla, až po dnešní sofistikovaný a globálně sjednocený systém SI. Přesná měření jsou dnes nezbytná nejen pro vědecký výzkum, ale i pro běžný život, obchod, průmysl a technologický rozvoj. Zavedení metrické soustavy a následně soustavy SI umožnilo mezinárodní spolupráci, standardizaci a eliminaci dřívějších nesrovnalostí v měření. Přestože některé země, například Spojené státy, stále používají vlastní měrové systémy, metrická soustava se stala celosvětovým standardem. [1, 2]

3 Ruční měření délkových rozměrů

V době, kdy počítačem řízené měřicí stroje (CMM) a počítačová tomografie (CT) dominují průmyslovým měřením, zůstávají ruční metody stále nenahraditelnou součástí metrologického arzenálu. Navzdory technologickému pokroku se ruční metody osvědčily zejména v případech, kdy je třeba rychle a efektivně provést měření přímo na výrobní lince či při kontrole citlivých součástí.

Moderní ruční měřicí nástroje se navíc vyznačují vysokou integrací s digitálními systémy, kde měřená data lze jednoduše přenášet do programů jako je Microsoft Excel, což usnadňuje další analýzu a archivaci výsledků. Dalším významným příkladem je použití posuvných měřidel vybavených ukazatelem přítlaku, které umožňují přesné měření i těch komponent, které jsou velmi měkké a poddajné. Taková zařízení minimalizují riziko poškození citlivých materiálů a zvyšují přesnost měření tam, kde by tradiční metody mohly selhat. A to vše v uživatelsky příjemné cenové hranici, v porovnání s ostatními metodami jako jsou CMM nebo CT jsou jednotky tisíc za tyto měřidla nesrovnatelně malou částkou, a proto mají stále aktuální roli v moderním průmyslovém prostředí. [4]

3.1 Třmenový mikrometr

Mikrometr je po posuvném měřítku pravděpodobně druhým nejpoužívanějším měřidlem. Základem každého mikrometru je jeho mikrometrický závit. Ten je vyroben s vysokou přesností se stoupáním 0,5 mm (v případě dílenského mikroskopu se jedná o stoupání 1 mm). Princip měření se odvíjí od vyšroubování šroubu s tímto mikrometrickým závitem a od jeho úhlu natočení. [5]

3.1.1 Konstrukce a princip

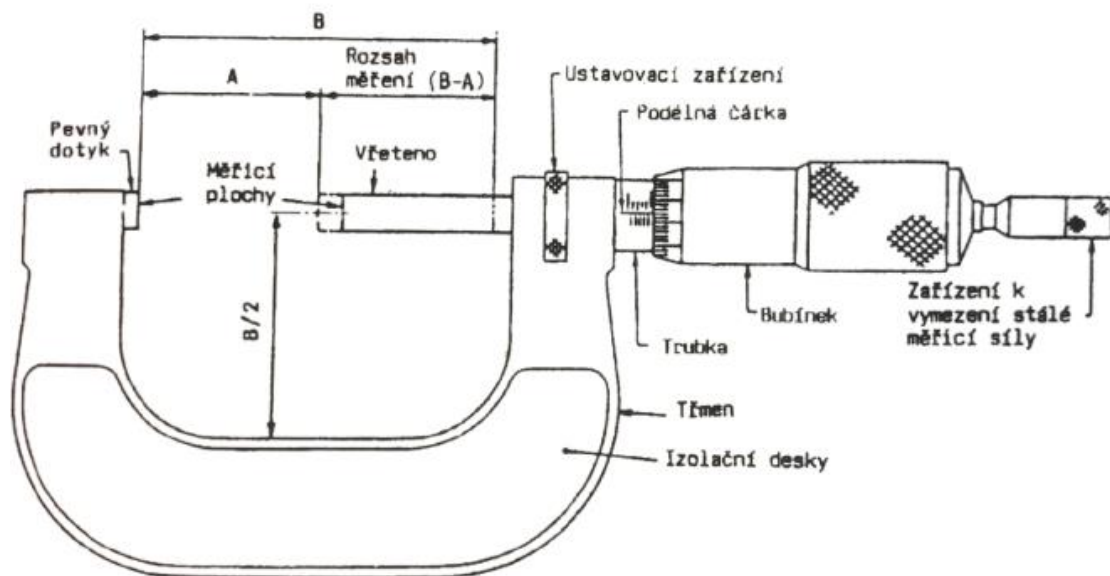
Jak již bylo zmíněno mikrometrická měřidla jsou založena na přesně zpracovaném šroubu s malým stoupáním, který umožňuje polohování měřicích dotyků a zajišťuje tak vyšší přesnost měření ve srovnání s posuvnými měřidly. Standardně jsou mikrometrické šrouby vyráběny o délce 25 mm (ve výjimečných případech se vyrábí šroub o délce 50 mm), což omezuje maximální měřicí rozsah jednotlivého přístroje. Aby bylo možné měřit větší rozměry, byly vyvinuty modulární mikrometry, u nichž lze za pomoci větších (někdy i skládaných) třmenů a prodlužovacích prvků dosáhnout výrazně vyšších rozsahů (viz obr. 1). [4, 5]

Obr. 1 Prodlužovací prvky mikrometru [4]



Konstrukce mikrometru zahrnuje dvě stupnice – milimetrovou, umístěnou na trubce, a rotační stupnici integrovanou v bubínku (viz obr. 2), která je zpravidla dělená na 50 dílků. Bubínek funguje jako matice, přičemž stoupání závitu činí 0,5 mm, což umožňuje dosažení nejmenší měřicí jednotky 0,01 mm. Aby bylo dosaženo posuvu o 1 mm, je nutné provést dvě kompletní otáčky bubínku. [5, 6]

Obr. 2 Konstrukce mikrometru [5]



Digitální mikrometry dále umožňují dosáhnout ještě vyšší přesnosti měření až 0,001 mm, což je výhodné při náročnějších aplikacích. Většina mikrometrických měřidel je navíc vybavena zařízením pro vymezení stálé měřicí síly (takzvanou řehťáčkou), které umožňuje vyvinutí rovnoměrné a optimální měřicí síly. Bez zařízení pro vymezení stálé měřicí síly by totiž mohlo dojít k deformaci měřené součásti nebo samotného přístroje při nadměrném zatížení, což by negativně ovlivnilo přesnost výsledného měření. Řehťáčka tak funguje jako ochranná spojka, která při překročení dovoleného tlaku „přeskočí“ a zabrání tak poškození zařízení a měřeného prvku. [5, 6]

Princip měření je následující: nejdříve se odečte hodnota celého milimetru horní rysky stupnice na trubce (případně se přičte polovina milimetru navíc když je dolní ryska viditelná). Následně se odečte hodnota na bubínku. Součet těchto dvou hodnot je námi hledaný rozměr. [5, 6]

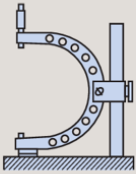
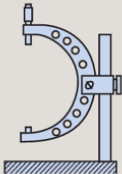
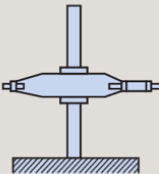
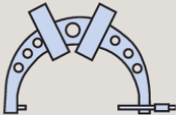
3.1.2 Elementy ovlivňující měření

Přesnost výsledného měření nám neovlivňuje pouze samotný přístroj někdy nám nepřesnost měření způsobí vnější vlivy. Tyto vlivy přehledně popsala firma MITORO. [7]

3.1.2.1 Vliv změny metody uchycení a orientace

Jakákoliv změna způsobu uchycení nebo orientace mikrometru, která nastane po nastavení nuly má nevyhnutelný vliv na následná měření. Jaké měřicí chyby lze očekávat v několika ukázkových variantách je popsáno na obrázku 3. Tyto výsledky potvrzují, že pro dosažení optimální přesnosti měření je nutné dodržovat jednotný způsob orientace a uchycení měřícího zařízení. [7]

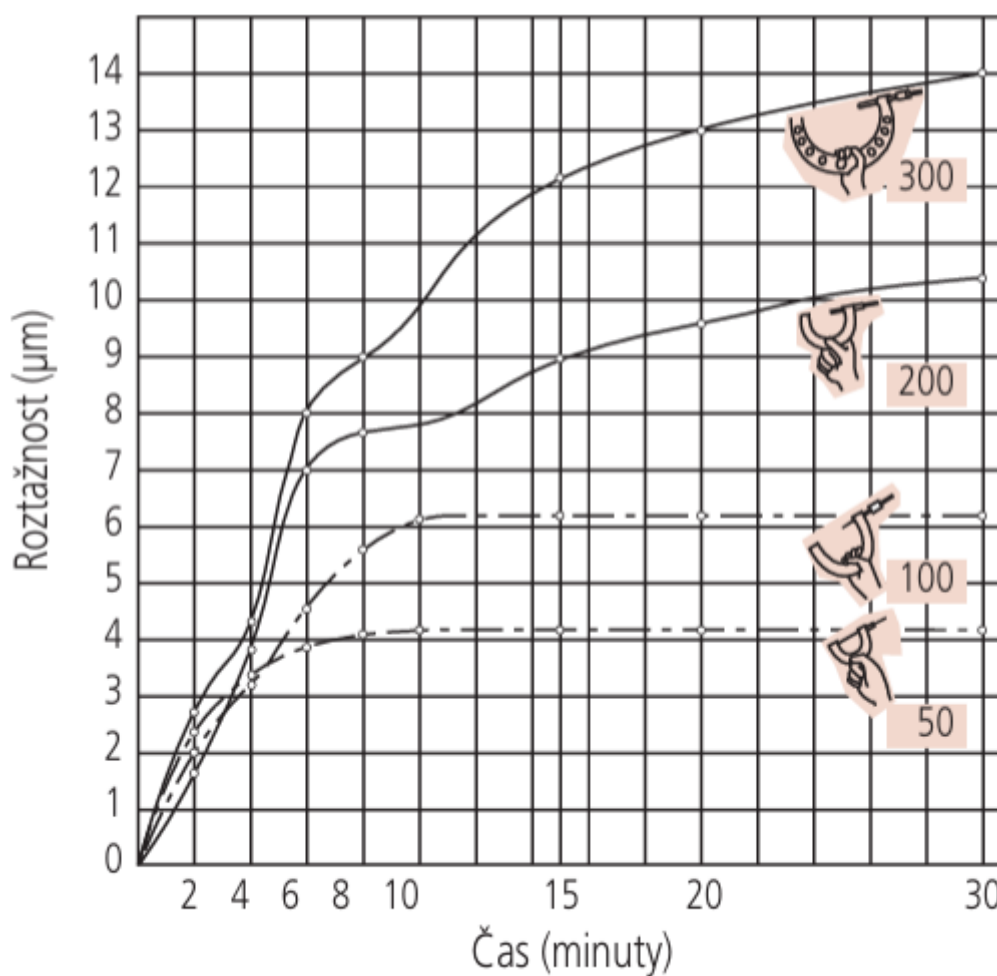
Obr. 3 Metody uchycení a jejich efekt [7]

	Uchyceno v dolní části a ve středu	Uchyceno pouze ve středu	Uchyceno ve středu v boční orientaci	Uchyceno rukou směrem dolů
Maximální měřená délka				
[mm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
325	0	-5,5	1,5	-4,5
425	0	-2,5	2,0	-10,5
525	0	-5,5	-4,5	-10,0
625	0	-11,0	0	-5,5
725	0	-9,5	-9,5	-19,0
825	0	-18,0	-5,0	-35,0
925	0	-22,5	-14,0	-27,0
1025	0	-26,0	-5,0	-40,0

3.1.2.2 Roztažnost mikrometru v důsledku držení holou rukou

Z grafu (obr. 4) je patrné, že při držení mikrometru v holé ruce se rám rozšiřuje vlivem tepla přenášeného z ruky, což vede k výrazným měřicím. Z tohoto důvodu je vhodné mít mikrometr uchycený ve stojanu či používat takzvaný „bench micrometer“ který má integrovaný stojan. Pokud je nutné mikrometr během měření držet, doporučuje se omezit dobu kontaktu na minimum. Instalace tepelně izolačního krytu významně snižuje účinky tepelné roztažnosti, nebo lze využít rukavice. [7]

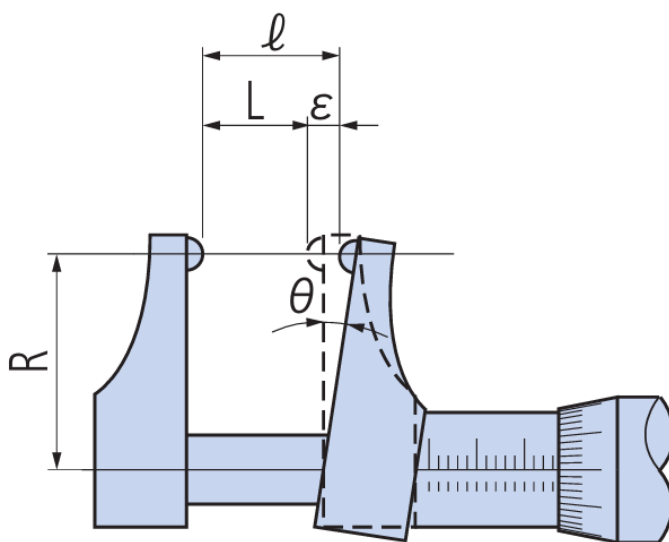
Obr. 4 Roztažnost mikrometru vlivem držení rukou [7]



3.1.2.3 Abbého princip

Abbého princip stanoví, že nejvyšší měřicí přesnost je dosažena, když jsou stupnice a měřicí osy uspořádány rovnoběžně. Důvodem je, že jakákoliv změna relativního úhlu θ při pohybu měřicí čelisti vyvolá posun, který není přímo zaznamenán na stupnici. Tento posun se označuje jako Abbého chyba (znázorněná jako $\varepsilon = l - L$ na obrázku 5). Nesoulad přímosti vřetena, vůle v jeho vedení nebo variabilita měřicí síly mohou způsobit odchylky, které se zvětšují s hodnotou R . [7]

Obr. 5 Abbého chyba [7]



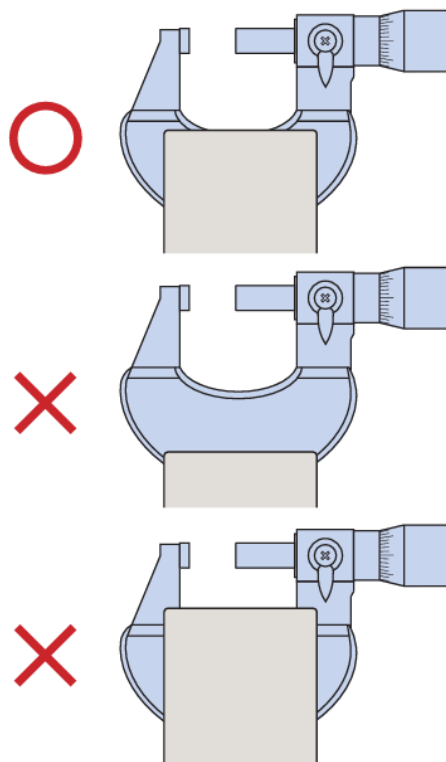
3.1.3 Desatero používání mikrometru

Pro zaručení dlouhotrvající přesnosti měření s mikrometrem je vhodné dodržovat jakési zásady použití. Ty se dají shrnout do následujících deseti pravidel používání. [7]

- Při výběru vhodného modelu je třeba nejprve provést kontrolu typu, měřicího rozsahu, přesnosti a dalších specifikací, které jsou určeny pro danou aplikaci.
- Před provedením měření je nutné ponechat mikrometr a obrobek při pokojové teplotě, dokud nedojde k vyrovnání jejich teplot.
- Odečítání proti bubínku s dělením se provádí tak, že se na základní rysku přímo hledí; při pozorování rysek pod úhlem není možné zajistit správné zarovnání, což vede k paralaxní chybě.
- Měřicí plocha pevného doteku a vřeteno jsou otřeny papírem nepouštějícím vlákna a před samotným měřením je nastaven počáteční (nulový) bod.

- Veškerý prach, piliny a jiné nečistoty z obvodu a měřicí plochy vřetena jsou odstraněny jako součást denní údržby a všechny nečistoty či otisky prstů na jednotlivých částech jsou důkladně setřeny suchým hadříkem.
- Pro dosažení správné měřicí síly je využívána konstantní síla přístroje.
- Při upevňování mikrometru do stojanu je zajištěno, aby upínání probíhalo v oblasti středu rámu, přičemž se zamezí přílišnému utažení. (viz obr. 6)
- Je dbáno na to, aby nedošlo k upuštění či nárazu mikrometru a aby bubínek nebyl otáčen s nadměrnou silou; v případě podezření na poškození v důsledku nesprávného zacházení je před dalším použitím provedena kontrola přesnosti.
- Po delší době skladování nebo v případě, kdy není patrný ochranný olejový film, je na mikrometr jemně nanesen antikorozi olej pomocí hadříku.
- Při skladování je zajištěno, že mikrometr není vystaven přímému slunečnímu záření, je uchováván na dobře větraném místě s nízkou vlhkostí a minimální prašností, přičemž je umístěn v pouzdru či jiném obalu, který není uložen na podlaze; současně je mezi měřicími plochami zachována mezera 0,1 až 1 mm a mikrometr není skladován v upnutém stavu.

Obr. 6 Upevnění mikrometru [7]



3.1.4 Atypické mikrometry

Kromě základní konstrukce mikrometru existuje řada modifikací, které umožňují pohodlnější, přesnější nebo dokonce jinak zcela neproveditelné měření. [4, 7]

3.1.4.1 S odlišnou konstrukcí

Mikrometrů s odlišnou konstrukcí nalezneme na trhu spousty například ve variace pro měření vnitřních rozměrů (viz obr. 7) nebo i měření hloubky. Do této skupiny můžeme zařadit dříve zmíněný „bench micrometer“ (viz obr. 8). Ten nám uvolňuje ruce, jelikož jej není třeba držet a současně tím nedochází k nežádoucímu vlivu rukou na měřidlo.

Obr. 7 Mikrometrický hloubkoměr [4]

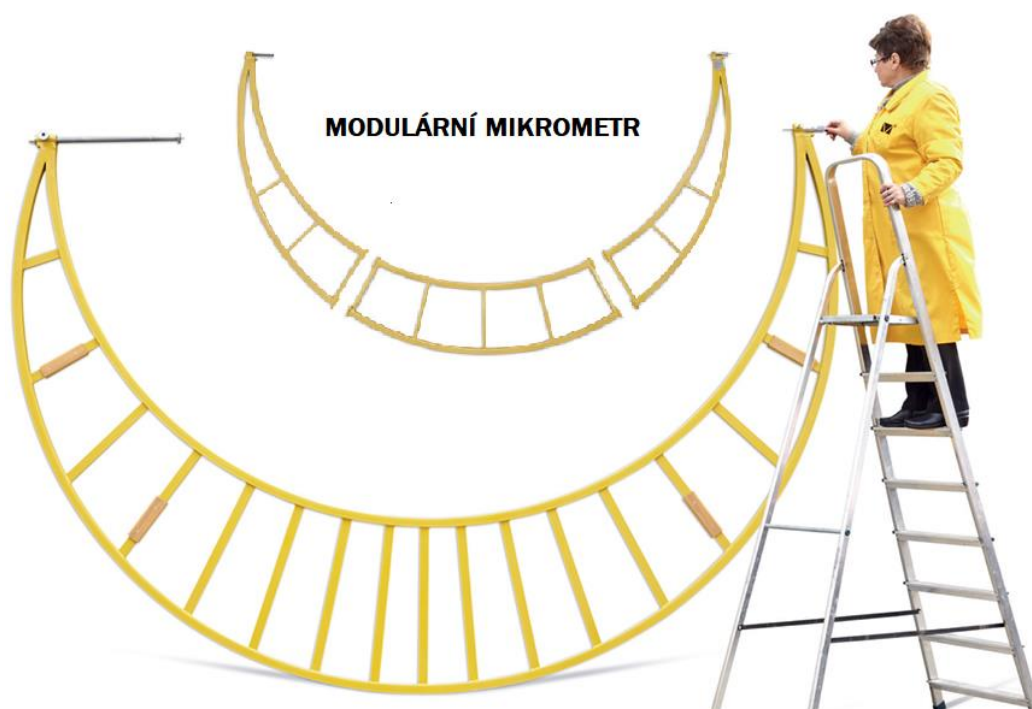


Obr. 8 Bench micrometr [4]



Dalšími populárními zástupci jsou mikrometry s většími rozsahy měření (wide range). Tato specifikace se zajišťuje buď za pomoci delšího mikrometrického šroubu (50 mm oproti standardním 25 mm) anebo s širokou konstrukcí třmenu. Tento třmen se vyrábí v některých případech modulární (viz obr. 9), takže je možné přizpůsobovat rozšíření dle potřeb. Jak již bylo zmíněno k těmto rozšířením se dají dokoupit i nástavce na dotyky pro ještě specifičtější rozhraní měření (viz obr. Konstrukce). S těmito vlastnostmi je tedy vhodný pro měření nadměrných rozměrů. [4]

Obr. 9 Modulární mikrometr [4]



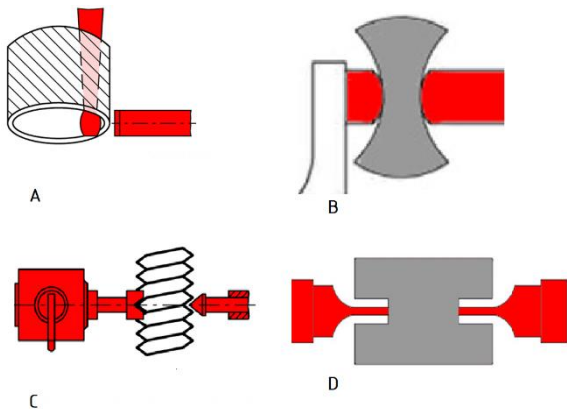
3.1.4.2 Se speciálními dotyky

Nejjednodušší modifikací mikrometru je výměna měřicích dotyků. Tato úprava nevyžaduje zásah do konstrukce samotného přístroje, stačí pouze nahradit původní dotyky těmi, které odpovídají požadovaným specifikacím. Mezi možné varianty speciálních dotyků patří například:

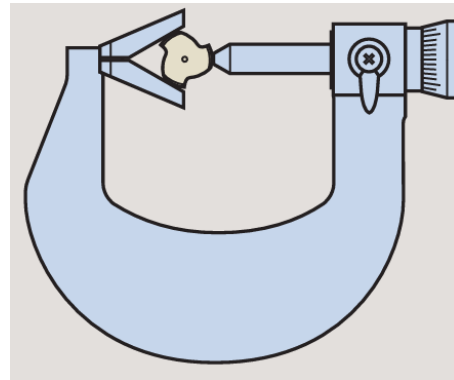
- Talířové dotyky
- Dotyky pro měření trubek (viz obr. 10 A)
- Sférické dotyky (viz. Obr. 10 B)

- Dotyky pro měření závitu (viz obr. 10 C)
- Úzké dotyky (viz obr. 10 D)
- Prizmatické dotyky pro měření fréz (viz obr. 11) mitoro
- Atd [4, 7]

Obr. 10 Speciální dotyky mikrometru [4]



Obr. 11 Prizmatické dotyky mikrometru [7]



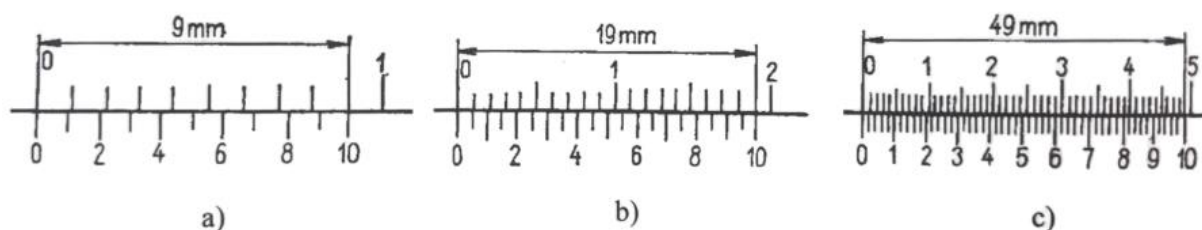
3.2 Posuvné měřítko

Posuvná měřidla jsou pravděpodobně nejrozšířenějším měřidlem jak ve výrobě, tak i v běžné praxi. [5] Nenabízí nejvyšší úroveň přesnosti (i když některé hlavně digitální posuvky nabízí přesnost měření v jednotkách mikrometrů) ale zato jsou jednoznačně nejrychlejší a nejjednodušší pro manipulaci. V dnešní době navíc nabízí širokou škálu funkcí jako je vymezení měřicí síly nebo sdílení naměřených hodnot přímo do počítače nebo do paměti samotné posuvky. [4]

3.2.1 Konstrukce a princip

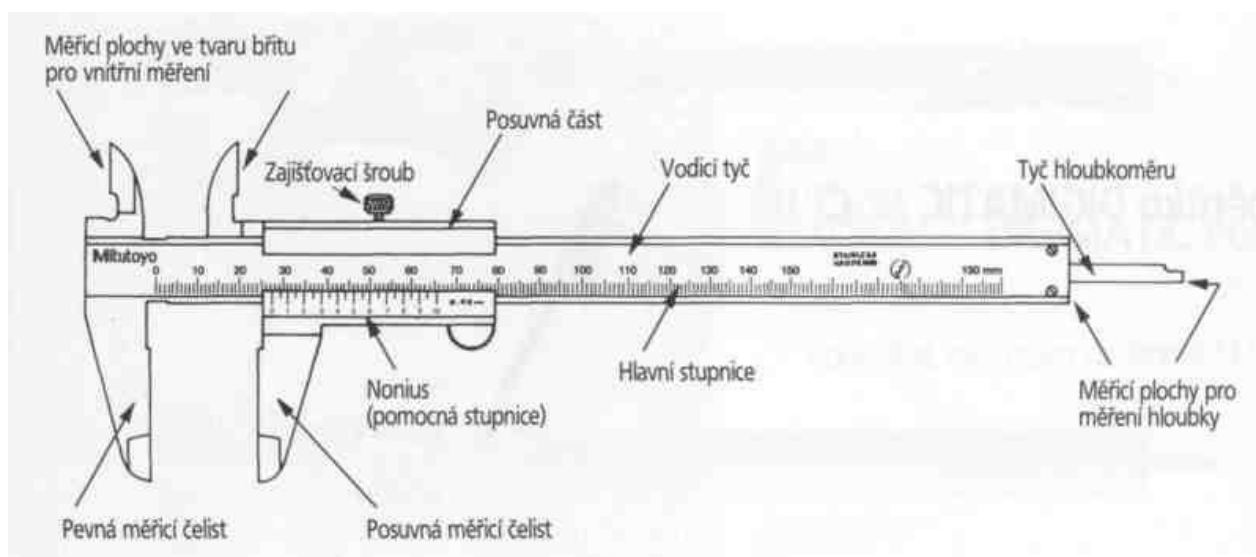
Základem posuvného měřítka jsou jeho rovnoběžné rovinné měřicí plochy (viz obr. 13). Jedna z ploch je pevná a je k ní připevněna hlavní stupnice (milimetrová a ve většině případech i palcová). Posuvná plocha je uložena na pomocné (nonické) stupnici (opět milimetrová a palcová zároveň) pro jemnější odečítání délek. Podle druhu nonické stupnice se odvíjí odečítání na 0,1mm (v případě desetinného nonia), 0,05mm (pro dvacetinový nonius) nebo na 0,02mm (pro padesátinový nonius). Princip nonia je vyobrazen na obrázku 12. [5, 8]

Obr. 12 Nonická stupnice [5]



Kromě těchto čelistí se na posuvném měřítku také nachází měřicí plochy pro měření vnitřních rozměrů a hloubkoměr. Všechny tyto jednotlivé měřicí prvky sdílejí jeden systém odečítání rozměru. V případě digitálního posuvného měřítka se místo vedlejší nonické stupnice používá displej, který ukazuje naměřenou hodnotu. Princip měření je následující: nejdříve se odečte rozměr z hlavní stupnice, který je v milimetrech a následně se na vedlejší stupnici najde čárka nonia která je souběžně s jinou čárkou na hlavní stupnici. Číslo souběžného dílku na noniu se vynásobí nonickou diferencí, a nakonec se obě tyto hodnoty sečtou. [5, 8]

Obr. 13 Konstrukce posuvného měřítka [8]



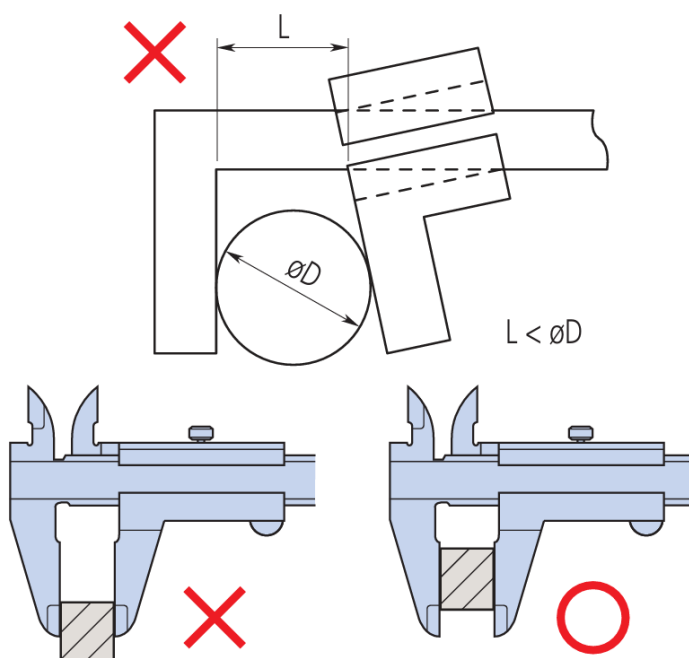
3.2.2 Elementy ovlivňující měření

To že naše měřidlo má stanovenou přesnost měření neznamená, že nemůžeme dosáhnout značně nepřesných výsledků. Do měření nám zasahuje celá řada vlivů stejně jako u mikrometrického měření.

3.2.2.1 Abbého princip

Nejvýraznějším vlivem je Abbého princip (popsaný v podkapitole 5.1.2.3), který ovšem lze minimalizovat použitím široké plochy měřicích čelistí (viz obr. 14). Tím se minimalizuje efekt páky na měřicí plochy a zachovává se tak rovnoběžnost měřicích ploch. [7]

Obr. 14 Abbého princip posuvného měřítka [7]



3.2.2.2 Teplota

Hlavní stupnice posuvného měřítka je vyryta (nebo namontována) na nerezovou ocel. I když je koeficient lineární teplotní roztažnosti jednoho z nejběžnějších materiálů obrobků velmi nízký je třeba brát na vědomí, že přesnost měření je u jiných materiálů ovlivňována pokojovou teplotou a teplotou obrobku. [7]

3.2.3 Atypická posuvná měřítka

Podobně jako u mikrometru se posuvná měřítka vyrábí s různou konstrukcí pro využití při specifickém měření. Trh uvádí například posuvné měřky s rozpětím až několika metrů nebo s různou délkou čelistí. Jsou speciální měřky pro měření ozubených kol a mnoho dalších. [4, 7]

3.2.3.1 Měření vnitřních rozměrů

Speciálními posuvnými měřítky můžeme přesně změřit veškeré vnitřní rozměry různých dutin jak kruhovitých, tak i jinak tvarově náročných včetně měření jednotlivých bodů. Například:

- Nožové měřky vnitřní (viz obr. 15)
- Ploché vnitřní čelisti (viz obr. 16)
- Měřky vnitřních bodů (viz obr. 17) [4, 7]

Obr. 15 Měřky vnitřních bodů [4]



Obr. 16 Nožové měřky vnitřní [4]

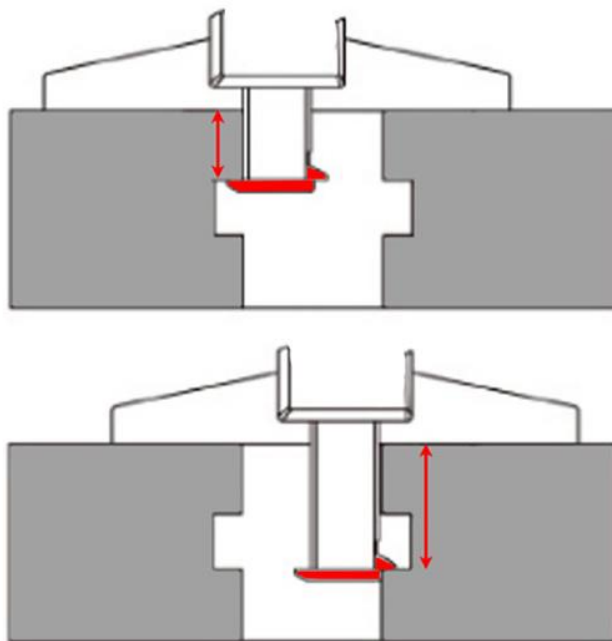


Obr. 17 Ploché vnitřní čelisti [4]



Vlastní skupinu tvoří také hloubkoměry, tedy posuvná měřítka uzpůsobená pouze pro měření hloubek. Kromě standardních hloubkoměrů, které umožňují prosté měření hloubky dutiny nalezneme i takové, které umožňují specifitější měření. V některých variacích jsou hloubkoměry vybaveny například hroty pro měření výšek vnitřních drážek (viz obr. 18). [4, 7]

Obr. 18 Hroty pro měření drážek [4]



3.2.3.2 Speciální čelisti

Čelisti jsou opět jako u dotyků mikrometrů nejčastěji modifikovanou částí měřidla. Pro speciální použití se vyrábí například:

- Posuvná měrka na měření závitů (viz obr. 19)
- Posuvná měrka pro měření tloušťky trubek (viz obr. 20)
- Čelisti pro měření vzdálenosti děr (viz obr. 21)

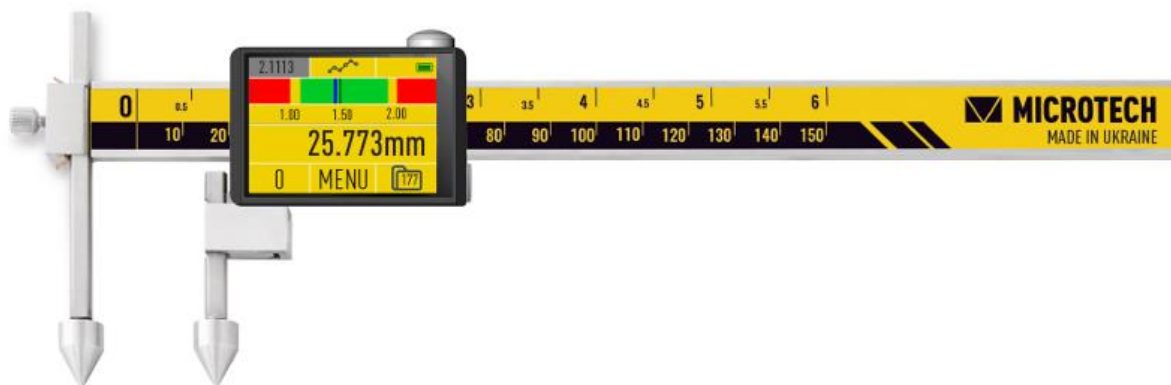
Obr. 199 Posuvná měrka na měření závitů [4]



Obr. 200 Posuvná měrka pro měření tloušťky trubek [4]



Obr. 21 Čelisti pro měření vzdálenosti děr [4]



4 Strojní měření rozměrů

Tam kde nám ruční metody měření nevyhovují, například z důvodu nedostatečné rychlosti měření nebo chceme měření automatizovat je ideální využít strojních metod. Jejich vlastnosti excelují v sériové výrobě zejména díky jejich rychlosti, zpracování dat a opakovatelnosti.

4.1 Souřadnicový měřicí stroj (CMM)

Souřadnicové měřicí stroje (CMM) představují základní nástroj v moderní průmyslové metrologii. Umožňují přesné a opakovatelné měření geometrie dílů tím, že systematicky zaznamenávají polohy jednotlivých bodů na povrchu měřeného objektu ve třech rozměrech. Tyto stroje nacházejí uplatnění v automobilovém, leteckém, strojírenském či optickém průmyslu, kde je klíčová kontrola jakosti a přesnost výroby [9].

4.1.1 Princip fungování

Základní princip CMM spočívá v tom, že měřicí hlava, vybavená buď kontaktní sondou, nebo bezkontaktním optickým systémem, provádí pohyby podél pevně definovaného kartézského souřadnicového systému (X, Y, Z). Při dotyku (u kontaktní metody) nebo při záznamu obrazu (u optické metody) je zaznamenána přesná poloha měřených bodů, která je dále zpracována počítačovým softwarem. Na základě těchto bodů lze následně rekonstruovat tvar, rozměry a případné odchylky od návrhových specifikací. [9, 10]

4.1.2 Rozdělení dle měřicí metody

Měřicí metody jsou v základu rozděleny na kontaktní a bezkontaktní. Výběr těchto metod je zcela individuální dle potřeb uživatele. V praxi mají optické metody delší dobu programování oproti metodám kontaktním, ale na druhou stranu po správném seřízení jsou schopny skenovat více bodů najednou kde kontaktní metoda sbírá jeden bod za druhým (lze i kontinuálně).

4.1.2.1 Kontaktní měření

U kontaktní metody měření se využívají dotykové sondy, kdy je měřicí hrot (často kulatý, například s rubínovou kuličkou) fyzicky přiveden do kontaktu s měřeným dílem. Při dotyku se mechanicky aktivuje snímací prvek, který okamžitě zaznamená souřadnice

kontaktu. Tato metoda umožňuje měření s velmi vysokou přesností a je vhodná zejména pro tvrdé a stacionární materiály, kde fyzický kontakt nevede k deformaci [9, 10].

4.1.2.2 Výhody

- Vysoká přesnost a opakovatelnost: Kontaktní měření je osvědčenou metodou pro získání přesných geometrických dat.
- Automatizace a integrace: Mnohé moderní CMM stroje umožňují automatické měření a ukládání dat, což snižuje vliv lidské chyby [11].

4.1.2.3 Nevýhody

- Riziko poškození měřeného dílu: U měkkých nebo křehkých materiálů může fyzický kontakt vést ke kontaminaci nebo deformaci.
- Relativně pomalejší měření: Při měření složitých geometrických útvarů může být nutné měřit jednotlivé body, což prodlužuje celkovou dobu měření. [11]

4.1.2.4 Optické (bezkontaktní) měření

Optické metody využívají bezkontaktní snímací systémy, například CCD (Charge-coupled device) kamery, laserové skenery či fotogrammetrii, ke získávání digitální podoby povrchu měřeného dílu. Místo přímého kontaktu se měří vzdálenost, tvar a orientace pomocí odrazu světla nebo laserového paprsku. Data jsou následně zpracována softwarem, který vytvoří „mračna“ bodů popisující geometrii objektu [9, 12].

4.1.2.5 Výhody

- Vysoká rychlost měření: Optické systémy dokážou zachytit tisíce až statisíce měřených bodů za sekundu, což je výhodné při kontrole velkých sérií.
- Bezkontaktní charakter: Metoda minimalizuje riziko poškození nebo deformace měřeného dílu, což je vhodné zejména pro měření měkkých, křehkých či velmi přesných komponentů. [11]

4.1.2.6 Nevýhody

- Závislost na povrchových vlastnostech: Kvalita měření může být ovlivněna odrazivostí, texturou či barvou povrchu dílu.

- Omezená přesnost u některých geometrických útvarů: I když se neustále zvyšuje přesnost optických systémů, u některých aplikací může být kontaktní metoda stále přesnější. [11]

4.1.3 Srovnání výhod a nevýhod

Obě metody mají své specifické oblasti uplatnění:

- Kontaktní měření se vyplatí zejména tam, kde je prioritou extrémní přesnost a měřený materiál je dostatečně tuhý, aby nedošlo k jeho deformaci. Díky možnosti automatizace je vhodné pro měření kritických geometrických parametrů v sériové výrobě.
- Optické měření nabízí výrazné zrychlení měření a je nezbytné pro objekty, kde kontakt může být problematický (například měkké materiály, křehké díly či velmi malé struktury). Na druhou stranu je třeba pečlivě kalibrovat měřicí systém a zajistit vhodné osvětlení či stabilitu prostředí, aby nebyly ovlivněny výsledky. [9-12]

4.1.4 Technické aspekty a kalibrace

Pro zajištění správného fungování CMM je důležitá nejen volba měřicí metody, ale i správná kalibrace a údržba stroje. Kalibrace zahrnuje nastavení referenčního bodu, vyrovnaní součásti s měřicím souřadnicovým systémem a kompenzaci systémových chyb. Moderní systémy často kombinují kontaktní a optické měření [10], což umožňuje využít silných stránek obou metod a eliminovat jejich slabiny. [12]

4.1.5 FIVE U-nique

FIVE U-nique od firmy HEXAGON představuje zcela programovatelný a flexibilní systém upevňování, který umožňuje rychlé sestavení přesných upínacích zařízení pro neomezený počet konfigurací dílů, čímž poskytuje stabilní oporu a referenční body pro kontrolovaný předmět. A to bez potřeby velkého množství konstrukcí a přípravků pro každý díl čímž šetří nejen čas, ale hlavně prostor, jelikož se pro všechny díly používají stejné sloupky jen v odlišném pořadí. [13]

Jedná se o inovativní řešení určené pro variabilní upevnění dílů při inspekci pomocí souřadnicové měřicí soustavy. Systém využívá právě tuto technologii k vytvoření přesných a opakovatelných upínacích zařízení ještě před spuštěním samotného měřicího programu. [13]

Klíčovým mechanickým prvkem je zdvihací sloup (viz obr. 22), dostupný v několika velikostech, který se montuje na základnu CMM a slouží jako podpůrný prvek pro díl podrobený kontrole. V závislosti na použitém stroji máte možnost volby mezi mechanickými či magnetickými základnami. K dispozici je také celá řada modulů pro podporu zajištění dílů, které se upevňují přímo na sloupce. [13]

Software navíc umožňuje uložit referenční polohu každého sloupce, což vám dává možnost přesného rozebrání a následného znovu sestavení upínací sestavy podle potřeby. [13]

Obr. 22 HEXAGON FIVE U-nique [13]



4.1.6 Rozdělení dle konstrukce

4.1.6.1 Měřicí mikroskopy a projektory

Měřicí mikroskop lze považovat za předchůdce všech souřadnicových měřicích strojů. V roli senzoru v tomto zařízení vystupuje samotný mikroskop doplněný o lidské oko. Při obsluze se nitkový kříž zabudovaný v zaměřovací části nastaví na požadovaný bod zkoumaného předmětu, následně se v nejjednodušším případě odečtou souřadnice z připojeného odměřovacího systému. Novější typy těchto mikroskopů již disponují přímým odečtem hodnot a vestavěnou vyhodnocovací jednotkou. Přestože se mnoho měřicích úkonů dnes provádí automatizovaně, tyto přístroje se stále vyrábějí. Jejich výsledky jsou nicméně ovlivněny tím, že v měřicím procesu hraje roli lidský zrak a mozek, tedy subjektivní faktor, který je zdrojem nepřesností. [10]

4.1.6.2 SMS s křížovým stolem

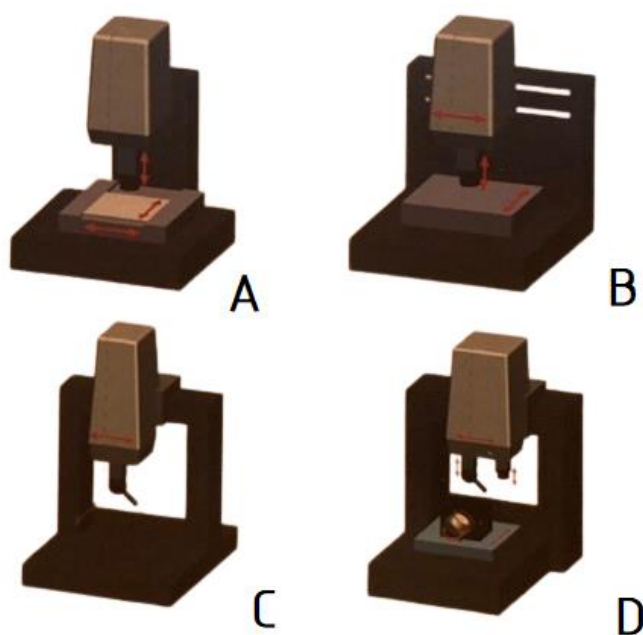
Mechanická konstrukce této skupiny souřadnicových měřicích strojů vychází z přirozeného pokračování vývoje měřicích mikroskopů a projektorů. Zpravidla sestává z křížového stolu uloženého v mechanickém vedení (viz obr. 23.A), přičemž i samotná hlavice je obdobně mechanicky zajištěna. Pro zlepšení přesnosti a stabilizaci vlivu teplot se často využívá hliník, který díky vysoké tepelné vodivosti omezuje teplotní deformace, a rovněž se uplatňují speciální vodící systémy s konstantním předpětím. Moderní provedení těchto strojů jsou ve všech třech osách většinou plně automatizována a pracují s rozsahem měření okolo 200 až 400 mm. Větší měřicí rozsahy se u této konstrukce obvykle nevyplatí z ekonomických důvodů. Přesnost je dále posilována pokročilým zpracováním obrazu a integrovanými výkonnými snímacími systémy, včetně laserových senzorů. U nejvyšší třídy stolních strojů se tak díky kombinaci různých snímacích mechanismů stávají tyto přístroje univerzálními souřadnicovými měřicími systémy. [10]

4.1.6.3 SMS s portálem

Souřadnicové měřicí stroje s portálem se používají tam, kde jsou požadavky na vysokou přesnost a větší měřicí rozsahy. Zpravidla mají robustní konstrukci z pevných materiálů, často s využitím vzduchových vedení či žulových vodících ploch pro minimalizaci tření a teplotních deformací. Portál se skládá ze dvou sloupů spojených mostem (traverzou), po kterém se pohybuje měřicí osa, přičemž na konci této osy je umístěna pinola nesoucí senzor či měřicí hlavu (viz obr. 23.C). Všechny tři osy lze řídit a odměřovat

centrálně, což přispívá k vyšší tuhosti systému a omezuje chyby měření. Díky stabilní konstrukci a dostatečné nosnosti bývá snadné na jednu pinolu instalovat více senzorů, což umožňuje rychlou výměnu snímacích hlav a podporuje multisenzorové metody měření (viz obr. 23.D). [10]

Obr. 23 Konstrukce CMM [10]



4.1.7 Senzory

Senzory pro souřadnicové měřicí stroje slouží k zachycení základního signálu, který vychází z měřeného objektu. Jejich provedení se liší podle stupně složitosti a může zahrnovat mechanické, optické, elektronické i softwarové komponenty. Při výběru vhodného senzoru je nutné zohlednit vlastnosti měřeného dílce, například jeho citlivost na dotyk či velikost zkoumaných geometrických prvků. Důležitou roli hrají také požadavky vyplývající z měřicího programu, jako je počet měřicích bodů. Z toho důvodu vždy záleží na tom, co přesně se měří a v jakém rozsahu. [10]

V současné praxi se senzory pro souřadnicové měřicí stroje obvykle dělí na optické a dotykové. U optických senzorů je poloha měřeného bodu stanovena na základě světelného signálu, zatímco dotykové senzory pracují s hrotem, který se fyzicky dotýká měřeného objektu. Důležitým parametrem je také „dimenzování“ senzoru, tedy zda umožňuje měření v jedné, dvou či třech souřadnicích. Vyšší počet snímaných os rozšiřuje možnosti měření, ale současně zvyšuje nutnost nastavovat senzor do různých pozic, což u složitých trojrozměrných předmětů vede k prodloužení celkové doby měření. [10]

4.1.7.1 Vizualní senzory

Vizuálním senzorem se rozumí každé snímací zařízení, které podobně jako lidské oko pracuje s alespoň dvojrozměrným zobrazením měřeného objektu. Tento senzor tedy zachycuje a vyhodnocuje rozložení intenzity či celkový optický obraz. Po dlouhou dobu bylo lidské oko jedinou dostupnou „vizuální“ možností pro optické souřadnicové měřicí stroje, například pro měřicí mikroskopy a projektory. Nevýhodou takového přístupu je subjektivní hodnocení polohy objektu, které může vést k chybám způsobeným například paralaxou či obtížným rozlišením hran. Výsledkem je spíše omezená přesnost v řádu desetin milimetru a také nižší rychlost měření. Přesto se vizuální snímání používá i v moderních systémech pro zpracování obrazu, hlavně tehdy, jsou-li měřené prvky obtížně rozeznatelné a intuitivní přístup lidského oka je výhodnější. Vysoké zvětšení optiky navíc umožňuje dosáhnout rozlišení i v mikrometrických hodnotách. [10]

4.1.7.2 Senzory měřící vzdálenost

Vizuální senzory popsané v předchozí podkapitole umožňují provádět měření převážně v rovinách, a tím se omezují na dvojrozměrné nebo stupňovité (2,5D) objekty. Pro plnohodnotné trojrozměrné měření je proto zapotřebí doplnit systém o metodu, která zvládne snímat rozměry ve třetí ose. V praxi se k tomu využívají senzory, jež dokážou měřit vzdálenost mezi snímacím prvkem a povrchem dílce, a proto se označují jako senzory měření vzdálenosti. [10]

4.1.7.3 Dotykové senzory

Princip dotykových senzorů spočívá v tom, že měřicí prvek fyzicky kontaktuje zkoumaný objekt a na základě tohoto dotyku vznikají signály pro další zpracování. Rozlišují se přitom dva hlavní typy snímačů: spínací a měřicí. Při samotném měření je nutné zohlednit geometrii snímacího prvku (zpravidla koule), její velikost i polohu v prostoru, protože tyto faktory spolu s tvarem měřeného povrchu určují konečný výsledek. Aby byla pozice snímací koule přesně stanovena, využívá se matematická korekce vycházející ze známých souřadnic středu koule. Velikost chyby vznikající při jejím zanedbání závisí na průměru koule. Čím je menší, tím je chyba nižší. Naopak větší koule mohou do určité míry vyhlazovat drobné nerovnosti povrchu (mechanické filtrování). Pro spolehlivé zachycení skutečné geometrie je pak obvykle nutné sejmutí více bodů na měřeném objektu. [10]

4.2 Výpočetní tomografie (CT)

Z anglického „computed tomography“ (dále jen CT) je typ tomografie využívající rentgenových paprsků pro nedestruktivní zobrazení části v detailně naskládaných vrstvách. [14]

Rentgenová tomografie nachází v průmyslové měřicí technice odlišné uplatnění než u klinických CT systémů. Zatímco u lékařských přístrojů se kvůli snímání paprsků z více úhlů pohybuje rentgenová sestava (zdroj a detektor) kolem nepohyblivého pacienta, v průmyslových aplikacích bývá naopak zdroj s detektorem obvykle pevný a rotuje se samotný vzorek. Předměty zkoumané v průmyslu navíc mohou obsahovat husté materiály, jež vyžadují vyšší energie záření. A tím se liší přístup k ochraně před ozářením: v lékařství je kladen mimořádný důraz na bezpečnost pacienta, zatímco v průmyslovém prostředí nebývá nutné tak rozsáhlé stínění a postupy se řídí jinými bezpečnostními standardy. Takže je možné využít vyšší intenzity záření. [15, 16, 17]

Pomocí CT je umožněno zkoumat a měřit například vady dílu v trojrozměrném prostoru. A to i nízko kontrastní vady jako jsou například bubliny či trhliny, které by byly jinými běžnými technikami nemožné zjistit. [17]

4.2.1 Princip rentgenové tomografie

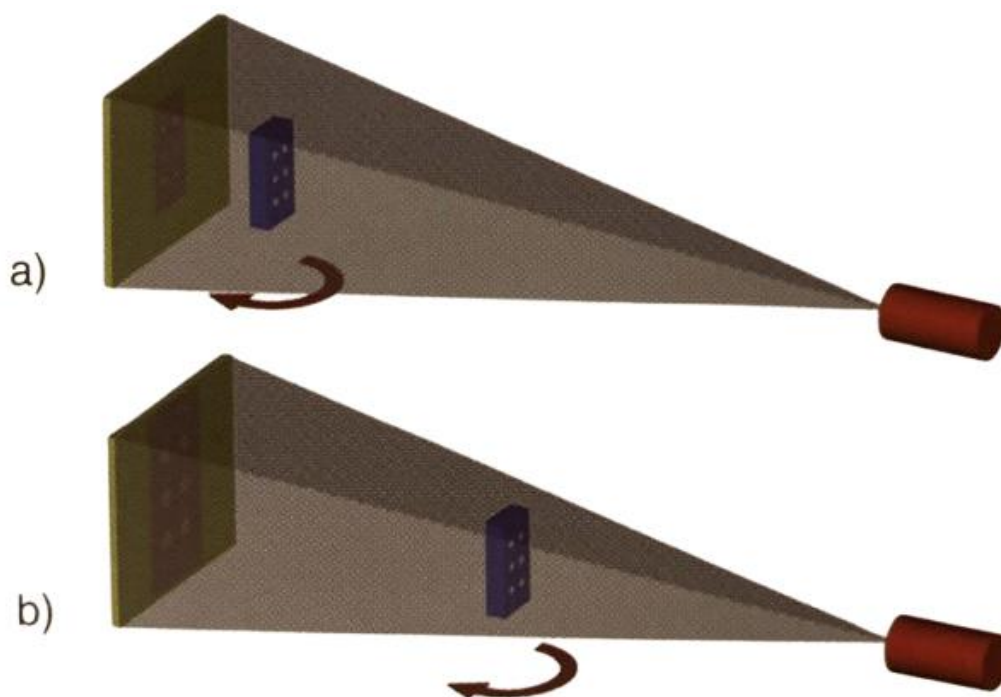
Základním principem rentgenové tomografie je využití schopnosti rentgenových paprsků procházet zkoumaným předmětem. K tomu slouží téměř bodový zdroj záření z rentgenky (Rentgenka neboli rentgenová lampa je zařízení sloužící k produkci rentgenového záření [18]), která vysílá paprsek směrem k detektoru. Při průchodu objektem dochází k pohlcování části záření. Čím delší je dráha paprsků nebo čím hustší je materiál, tím méně záření pronikne na druhou stranu. Tím se na výsledném obrazu projeví rozdíly v jasů, podobně jako při osvětlení částečně průsvitného předmětu bodovým zdrojem světla. [15, 16, 17]

Kuželový (nebo jehlanový) rentgenový paprsek, produkuje dvourozměrné stínové snímky objektu, které detektor snímá analogicky podobně jako digitální fotoaparát a ukládá je v elektronické formě. Těchto snímků se v průběhu měření vytvoří řádově stovky a následně se pomocí matematických rekonstrukčních postupů vytvořit trojrozměrný model.

Takto získaná 3D představa o vnitřní stavbě předmětu umožňuje provádět různé analýzy a nedestruktivní měření v libovolných rovinách řezu. Může se tímto způsobem snímat celá součást nebo v případě potřeby jen námi zkoumaná část. Tím se dá zkrátit celkový čas měření anebo snímat jinak příliš veliké součásti. [15]

Relativní rozlišení takto získaného obrazu závisí především na relativním posunutí rotační osy, popřípadě měřeného objektu vůči zdroji rentgenových paprsků (viz obr. 24). Do hry vstupuje také ostrost zaostření, přesnost rotace zkoumaného objektu i další parametry samotného CT přístroje. Tyto faktory se doladují kalibračními metodami, aby bylo možné provádět trojrozměrná měření s co největší přesností. [15]

Obr. 24 Zvětšení měřeného objektu [15]

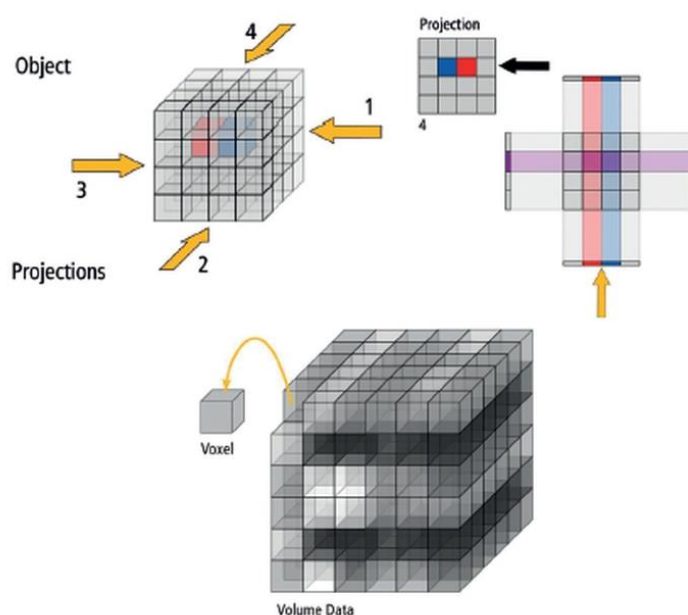


4.2.2 Získání rozměrů z rentgenových snímků

Analogickým výpočtem lze z dvourozměrných rentgenových snímků získat prostorová data. Zatímco 2 D optické senzory zpracovávají obraz pomocí pixelů jakožto jednotlivých bodů, které reprezentují lokální intenzitu světla na rovinné, pravidelné mřížce, rentgenové tomografy využívají voxely (volumetric pixel) (viz obr. 25), tedy objemové obrazové body, které zachycují lokální absorpci záření v pravidelné třídimenzionální mřížce. Tmavé voxely znázorňují oblasti s nízkou absorpcí (například vzduch), zatímco světlé voxely představují místa s vysokou absorpcí, jako je kov. Podobně jako u negativu v

černobílé fotografii, kde jsou hodnoty intenzity světla zobrazeny inverzně, jsou i hodnoty absorpce prezentovány „obráceně“. Většinou se voxelová data získávají metodou filtrovaného zpětného promítání z 2 D projekčních snímků. [15]

Obr. 25 Voxel [17]



Rekonstrukce snímku se skládá ze tří hlavních kroků:

- příprava dat před jejich zpracováním
- filtrace
- zpětné promítání

4.2.2.1 příprava dat před jejich zpracováním

V rámci přípravy dat se provádí normalizace projekčních snímků, po které následuje postup nahrazující exponenciální útlum záření při jeho průchodu materiálem lineárním modelem. Záření se totiž v každém objemovém prvku dále zeslabuje o hodnotu odpovídající předchozím vrstvám materiálu. Hodnoty šedi, které se v projekčních snímcích nacházejí, již neodpovídají přímo naměřené intenzitě záření. Namísto toho představují součet hodnot útlumu nebo hustoty objektů podél rentgenového paprsku. Tento součet se označuje jako přímkový integrál. Prakticky to znamená, že každý pixel v rentgenovém detektoru reprezentuje souhrn hodnot voxelů na dráze daného paprsku skrz objekt. Aby bylo možné z

těchto dat vypočítat objem, je nutné zpětně provést matematickou operaci opačnou k původnímu výpočtu. Tento proces zahrnuje filtrování projekčních dat. [15]

4.2.2.2 Filtrace

Filtrace se provádí konvolucí jednotlivých řádků detektoru pomocí filtrační funkce, která zvýrazňuje hrany. Tento postup lze přirovnat k digitálnímu zaostření fotografie v editačním softwaru. Na rozdíl od fotografického zaostření, které slouží hlavně ke zlepšení vizuální kvality, je konvoluce v tomografii klíčová pro získání správných dat. [15]

4.2.2.3 Zpětné promítání

Po dokončení filtrace se z projekčních snímků zpětným promítáním vytvoří objemová data. Tento proces probíhá obráceně oproti vytváření projekčních snímků měřicím strojem. Výsledkem je tzv. virtuální měřicí objem, kde se k jednotlivým voxelům přiřítají hodnoty získané z různých úhlů snímání. Tento proces se provádí v původním směru paprsků, které byly během měření zaznamenány. Rekonstrukce obrazu je kompletní, jakmile jsou všechny projekční snímky promítnuty zpět. [15]

Objemové informace získané tímto způsobem se používají například při vizuální kontrole vad materiálu, jako jsou póry nebo vměstky. K určení přesných rozměrů je nutné zjistit polohu přechodů mezi jednotlivými materiály (např. mezi kovem a vzduchem). K tomu se vypočítají souřadnice bodů na povrchu objektu z amplitud voxelů. Tento přístup umožňuje dosáhnout lepšího rozlišení při určování hran, než by bylo možné pouze z průměrné vzdálenosti voxelové mřížky. [15]

Při zpracování objemových dat se používá tzv. dělení voxelů, tento proces lze realizovat různými metodami, například výpočtem hran pomocí lineární interpolace amplitud voxelů nebo stanovením hran na základě lokálních maxim na diferencovaném objemu. Tyto metody výrazně ovlivňují celkovou přesnost výsledného zobrazení. [15]

4.2.3 Zlepšení využití CT

Možnosti stroje lze výrazně rozšířit přidáním nových senzorů – například integrací kamery s pokročilým systémem pro zpracování obrazu, který umožňuje automatické a velmi přesné měření i na extrémně málo kontrastních či komplikovaných površích. Laserové senzory zajistí detailní snímání profilů povrchů, zatímco dotykové senzory umožní přesné určení tvarů, které nejsou dostupné optickými metodami, a obě tyto technologie dále přispívají k matematické korekci a zvýšení přesnosti tomografických měření. Další zajímavou aplikací je digitalizace nezdokumentovaných součástí pro účely reverzního inženýrství, přičemž intuitivní grafické instrukce vhodné pro dílenské prostředí a software, který slučuje všechny nezbytné funkce od zpracování dat až po tvorbu nebo porovnání CAD modelů, poskytují komplexní podporu měřicího procesu. Kombinace metod, jako jsou CT, optické snímání, laserové měření a 3 D kontaktní či dotykové skenování, výrazně zvyšuje flexibilitu a rozšiřuje pole působnosti celého systému. [16]

4.3 Porovnání mezi CMM a CT

Multisenzorová měřicí technika a CT představují dva odlišné přístupy k získávání trojrozměrných dat, přičemž každý z nich má své specifické výhody i omezení. CT využívá rentgenové paprsky k detailnímu zobrazení vnitřních struktur měřených objektů, což je ideální pro analýzu materiálových vlastností a odhalování vnitřních defektů, avšak její účinnost může být omezena u objektů s nízkým kontrastem nebo u materiálů s vysokou hustotou kdy ve výsledném modelu vznikají „díry“ v objektu. Naopak multisenzorová měřicí technika kombinuje více měřicích metod – například optické, laserové a dotykové senzory – což umožňuje získat komplexní a přesná data nejen o povrchové geometrii, ale i o tvarech, které by se optickými metodami obtížně měřily. Díky možnosti matematické korekce a integraci různých senzorů poskytuje tato technologie vyšší flexibilitu a širší spektrum aplikací, například při digitalizaci nezdokumentovaných součástí pro reverzní inženýrství. Zatímco CT exceluje ve vytváření vysoce detailních 3D modelů vnitřních struktur, multisenzorový přístup umožňuje adaptovat měřicí systém na specifické požadavky různých měřených objektů a prostředí, což zvyšuje přesnost a robustnost výsledných dat. Podle článku na MMSpektrum [19] tedy CT i multisenzorová technika mají své místo v oblasti měření. [19]

5 Měření Povrchu

V praxi je často pod pojmem měření povrchu myšleno měření jeho drsnosti, ta je totiž jednou ze základních jakostních parametrů polotovaru nebo již hotového výrobku. Dodržení určité drsnosti nám plní pracovní nebo někdy i estetickou funkci výrobku. Drsností jsou rozuměny nerovnoměrnosti nebo výškové rozdíly povrchu. [20] Viníkem těchto odchylek tvaru je nejčastěji řezná hrana nástroje při povrchovém zpracování. [21] Ovšem během výrobních procesů je možné dosáhnout pouze určitých hodnot drsnosti v rámci tolerancí. Každá technologie má proto definovanou svou vlastní hodnotu drsnosti výsledného produktu. V praxi to znamená, že se tolerance drsnosti stanovují ještě ve fázi návrhu s ohledem na zvolené výrobní procesy. [20] Nerovnosti povrchu jsou rozděleny na geometrické mikrostruktury neboli drsnost povrchu, která je dána stopami, které zanechává řezný nástroj, případně brusivo a geometrické makrostruktury jež se nazývají vlnitostí povrchu a jsou nejčastěji způsobeny vibrací celé soustavy (Stroj – Nástroj – Obrobek – Prostředí). U obrobených povrchů je následně zapotřebí navzájem tyto jednotlivé nerovnosti odfiltrovat, jelikož se vzájemně překrývají (tedy rozdělit na drsnost a vlnitost povrchu). [21]

5.1 Metody měření drsnosti

Drsnost povrchu můžeme měřit buď kvalitativně kdy se jedná o porovnávání povrchu s referenčním povrchem (komparačním mikroskopem nebo pomocí vzorkovnice povrchů) nebo kvantitativně kdy se zjišťují parametry pomocí matematických popisů za použití profilometrů. V dnešní době je třeba podotknout že metody kvalitativní jsou méně užívané, a to zejména kvůli subjektivitě měření kdy je metoda založena na schopnostech pracovníka povrch zhodnotit oproti tomu metoda kvantitativní je více exaktní. A tím spíše vhodná pro dnešní nároky na přesnost. [21]

5.2 Kontaktní měření povrchu

Kontaktní měřicí přístroj je založený na vyhodnocování souřadnice povrchu speciálně upraveného hrotu, kdy počítač vyhodnocuje snímané příčné pohyby tohoto hrotu. Přístroj má dvě základní části: mechanickou a elektronickou. Do mechanické části patří stolek, který je základem pro umístění měřené součásti a ramena se snímací hlavicí (hrot měřidla), která zajišťují mechanický pohyb. Ramena se pohybují konstantní rychlostí a do toho hrot snímá povrchové nerovnosti. Elektrická část je předurčena k transformaci signálu z mechanické

části na elektrický signál, který je počítačem zpracován buď na číselnou hodnotu daného parametru nebo na grafický záznam nerovnosti měřeného povrchu. [21]

Mechanické metody měření profilometrem se zakládají na posouvání měřicího hrotu po předem určené délce povrchu [25], proto pohyb snímacího hrotu musí být velmi přesný z hlediska přímého směru a rovnoměrnosti. Cílem je se při měření co nejvíce přiblížit požadované normy drsnosti, a proto lze na profilometrech přepínat rozteč systematických nerovností a tím tyto rušivé prvky filtrovat. [25, 26] Rychlost je nutné volit s ohledem na dynamické vlastnosti snímacího systému. Tyto zařízení často umožňují přenos naměřených dat do počítače, obvykle prostřednictvím USB nebo COM rozhraní, kde mohou být dále analyzována či uschována v databázi pro případnou budoucí potřebu. Vertikální pohyb hrotu při překonávání nerovností je snímán indukčním měřidlem, které jej převádí na elektrický signál. Tento signál je následně zpracován a vyhodnocen pomocí počítačových systémů. Charakteristickým rysem tohoto snímacího mechanismu je nízká měřicí síla, tedy minimální přítlak hrotu na povrch, což snižuje riziko jeho poškození. [21]

Na trhu najdeme profilometry dílenské, které se vyznačují svou kompaktní až kapesní velikostí a jednoduchým použitím. Dílenské profilometry se nejčastěji používají bez stativu a pouze se přiloží k měřenému povrchu. Jejich vrcholový hrot má větší vrcholový úhel větší poloměr zaoblení, takže se jedná o méně přesné měření. Ovšem pro rychlé jednoduché měření může být tato metoda ideální. Chceme-li zvýšit přesnost měření nebo máme plochu v hůře dostupném místě a náš dílenský profilometr není schopen tuto plochu změřit je zapotřebí použití laboratorního profilometru. Ty nám za pomoci vyměnitelných snímacích ramínek umožňují měření veliké variace ploch. Důraz je kladen na vysokou citlivost při snímání jemných nerovností. Proto má snímací hrot menší vrcholový úhel a malý poloměr zaoblení, což jej činí citlivějším. Měření se obvykle provádí ze stativu a příčné pohyby hrotu jsou zachycovány Hallovy sondami, které zajišťují vysokou přesnost a linearitu. Profilometr lze také připojit k počítači pro evidenci naměřených hodnot a tisk protokolů. [25]

Ve strojírenském prostředí mají kontaktní metody oproti bezkontaktním tu výhodu, že jsou méně citlivé na znečištění. Snímací hrot dokáže odsunout drobné nečistoty nebo mu nevadí přítomnost olejového filmu. Naproti tomu bezkontaktní sondy vyžadují dokonale čistý povrch pro přesné měření. Ve strojírenské praxi se proto stále spíše preferují kontaktní měřicí přístroje před bezkontaktními. [21]

5.2.1 Vliv drsnosti povrchu při použití mechanické sondy

Při snímání dat mechanickou sondou dochází k přímému kontaktu mezi sondou a měřeným povrchem. Sonda je obvykle zakončena kulovou plochou s definovaným poloměrem. Měření probíhá buď pohybem sondy po kontuře digitalizovaného povrchu, nebo jejím vlečením po jeho dráze. Vzhledem k nerovnostem povrchu mohou vznikat určité odchylky v naměřených datech, protože sonda sleduje skutečný profil povrchu, který se kvůli drsnosti a dalším nepravidlostem odlišuje od ideálního teoretického tvaru. Drsnost povrchu tak přímo ovlivňuje přesnost měření prováděného kulovou sondou. Jelikož teoretický bod, kterým by se sonda měla dotýkat povrchu je na vrcholu kulové plochy může dojít k situaci, při které se sonda dotkne povrchu v jiném bodě své kulové plochy a znemožní tak úplné dojetí teoretického dotkového bodu na povrch vlivem nerovností. Tuhle situaci prostě řečeno "nedojetí" způsobí odchylku v naměřené hodnotě Z na souřadnici X. Odchylku naměřené hodnoty mají za příčinu dva faktory. Prvním faktorem je samozřejmě poloměr samotné sondy neboli čím větší je tento poloměr, tím hůře sonda zvládne změřit špatně přístupná místa na profilu plochy, a tím roste odchylka naměřené hodnoty. Větší sondy mají tendenci střední čáru nového (naměřeného) profilu přiblížit k nejvyšším vrcholům povrchu a profil tím částečně vyhlazovat. Druhým faktorem je pak samotná drsnost, tedy nerovnost snímaného povrchu. Především problém vytváří rychle se měnící výškové nerovnosti, které zvyšují odchylky námi měřené hodnoty. Při takto profilovaném povrchu sonda přeskakuje mezery a pouze snímá nejvyšší vrcholky profilu plochy a vůči nejhlubším místům nabývá největších odchylek. To má za následek vytvoření nového nekorektního profilu povrchu, který se od skutečného liší právě o odchylky „nedojetí“. Těmito nežádoucími vlivy se měření staví v podstatě na nejvyšších vrcholcích profilu plochy a tím je měření značně nepřesné. [25]

Dle stránky proinex.cz [25] byl proveden pokus zabývající se zkoušením různých velikostí sond a dle jejich závěru snímání povrchu sondou o poloměru 0,75 mm je možné pouze u ploch, jejichž hodnota drsnosti R_z je maximálně 3,2 až 5 μm . Při měření s nejčastěji používanou sondou o poloměru 1,5 mm nesmí hodnota drsnosti R_z přesáhnout 3 μm . Při nedodržení těchto zásad se snižuje vypovídací schopnost provedeného měření. [25]

5.3 Bezkontaktní měření povrchu

V laboratorní a vědecké praxi kde čistota není problémem se převážně používají přístroje pro hodnocení povrchů, které pracují na bezkontaktním principu a využívají bezkontaktní snímače. Často používanými snímači jsou typu CLA (Chromatic Length Aberration) a laserové snímače. Snímače CLA mají lepší rozlišitelnost, zatímco rozlišovací schopnost laserových snímačů je přibližně o jednu řádovou hodnotu nižší. Princip snímače CLA lze popsat následovně: Bílé světlo je rozloženo a optikou směřováno na měřený povrch. Optika světlo rozkládá podle vlnových délek a na každém bodě povrchu je zaostřena pouze určitá vlnová délka. Světlo odražené od povrchu prochází otvorem, který propustí pouze světlo zaostřené na konkrétní vlnovou délku. Spektrometr vychýlí světlo na maticový senzor, kde je každému bodu přiřazena prostorová pozice, která je následně zpracována a vyhodnocena počítačem. Místo CLA snímačů lze použít také laserové snímače, které však nejsou tak přesné. Naměřené prostorové polohy jsou následně zpracovány speciálními softwary, které umožňují 3 D analýzu dat, včetně vizualizace ve 3D programu. [21]

5.3.1 Interferometrie

Interferometrie představuje vyspělou optickou metodu, která využívá vlastností koherentního světla k detailnímu zmapování povrchové topografie. Při měření drsnosti povrchu se tato technika opírá o princip interference – světlo odražené z testovaného povrchu se srovnává s paprskem z referenčního zrcadla, což vede ke vzniku interferenčního vzoru. Detailní analýzou tohoto vzoru lze odhalit i velmi jemné nerovnosti a nepravidelnosti povrchu, což umožňuje vyhodnotit kvalitu a funkčnost měřeného materiálu. Díky své vysoké přesnosti, neinvazivní povaze a schopnosti zachytit mikrostruktury je interferometrie často preferovanou metodou v oblasti kontroly povrchové drsnosti. Využití je u měření výšky velmi hladkých až středně drsných povrchů, přičemž systémový šum zůstává stejný při jakémkoli zvětšení. [27]

Interferometry jsou nejpřímější aplikací principu interference (popsáno v podkapitole 5.3.1.1). Je to také jednou z nejcitlivějších metod měření malých posunů nebo malých změn délky optické dráhy vyvolaných pohybem objektů, změnami nebo nepravidelnostmi struktury povrchu. Interferometry se používají k analýze zakřivení čoček a posunutí jemných obráběcích zařízení nebo k vizualizaci proudových polí s citlivostí, která může dosáhnout zlomku vlnové délky použité pro měření. [28]

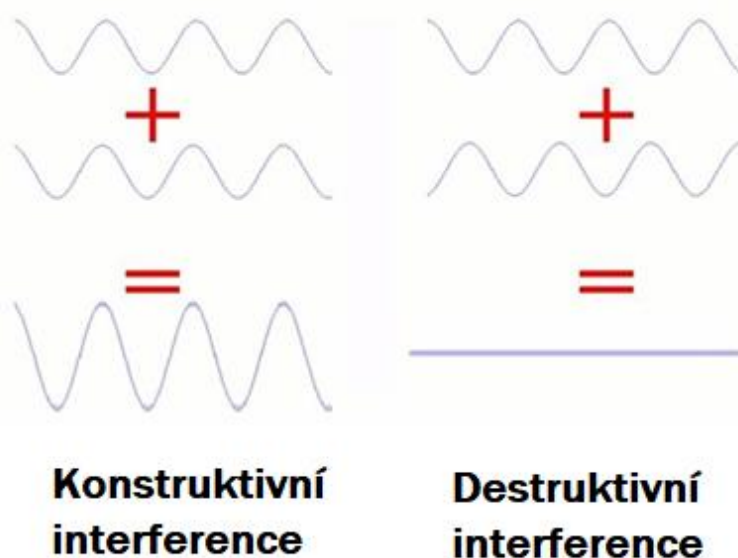
5.3.1.1 Interference

Interference světla představuje jev, při kterém se při setkání dvou či více světelných vln navzájem skládají a výsledná intenzita světla závisí na relativním fázovém posunu zmíněných vln. Jinými slovy, když jsou koherentní světelné vlny – tedy vlny se stejnou frekvencí a konstantním fázovým vztahem – vystaveny vzájemné superpozici, může dojít k jejich zesílení (konstruktivní interference) nebo naopak ke vzájemnému rušení (destruktivní interference). [29]

Při konstruktivní interferenci se maximální hodnoty (amplitudy) jednotlivých vln shodují, což vede k vytvoření oblastí se značně zvýšenou intenzitou světla. Naopak, pokud jsou vlny posunuty o půl vlnové délky (často popisováno jako o lichý násobek poloviny vlnové délky), dochází k jejich destruktivnímu skládání, což se projevuje výrazným snížením, případně úplným zrušením světelného signálu (viz obr. 26). [29]

Klíčovým předpokladem pro vznik jasného a stabilního interferenčního obrazce je koherence světla. To nám totiž zajišťuje stálý fázový vztah mezi jednotlivými vlnami, což umožňuje přesné určení rozdílu jejich optických drah. Takto pomocí měření fázového rozdílu mezi dvěma světelnými paprsky lze dosáhnout velmi vysoké přesnosti při určování délkových změn materiálů. [29]

Obr. 26 Kombinace vlnových délek [30]



5.3.2 Konfokální technologie

Konfokální technologie představuje optickou metodu, která se osvědčuje při měření drsnosti povrchů díky své schopnosti selektivně sbírat světlo ze zvolené hloubky. Princip této metody spočívá v zaostření světelného paprsku na specifickou vrstvu materiálu, čímž se eliminují rušivé vlivy signálů z okolních úrovní. Měřicí systém využívá optické filtry a rychlé skenovací mechanismy, jež přispívají k vytvoření detailní 3D mapy povrchu, což je klíčové pro správnou charakterizaci drsnosti. [27]

5.3.3 Ai Focus Variation

Ai Focus Variation představuje optickou metodu, která využívá změny v ostrosti obrazu k získání detailních informací o topografii povrchu. Princip spočívá v postupném posouvání optického systému, při kterém se zaznamenávají změny světelné intenzity. Analýzou těchto změn se určí okamžik, kdy je každý bod povrchu nejostřejší. Tento postup umožňuje vytvořit přesnou 3 D mapu velkých povrchů a následně vyhodnotit jejich drsnost. [27]

5.3.4 Vliv drsnosti povrchu při optických a laserových metodách

Z předchozí kapitoly by mohlo vyplývat, že použití mechanické sondy je problémové a podřadné měření opticky či laserem. Ovšem i tyto metody mají své úskalí a nedostatky. Problém nastává v oblasti, kde se velikost mikro-nerovností povrchu pohybuje v oblasti vlnových délek světelného záření použitých sond. Tato vada je zřejmá například u proužkové interferometrie. Při této metodě je CCD (Charge-Coupled Device) kamerou snímáný povrch ozařován laserem. Vyhodnocení je zpracováno na základě srovnání s druhým referenčním povrchem. Pokud je povrch hladký, výsledkem měření je obrazový záznam složený z interferenčních proužků, jejichž pozice, rozměr a tvar se dále vyhodnocuje. Pokud ovšem přesáhne drsnost povrchu R_a rozměr čtvrtiny vlnové délky použitého světelného záření, dojde k rozpadu interferenčního obrazce. Tento jev je následně nutno danými postupy odstraňovat. Nejjednodušší cestou, jak tomuto jevu zamezit je změnit vlnovou délku zdroje světla na měřidle. Na tomto principu jsou vyvíjeny dnešní interferometry a další přístroje využívající interferometrii. Při měření drsnosti se tento jev dá použít také k prospěchu, a to použitím světelných zdrojů s různými vlnovými délkami můžeme rychle určit drsnost povrchu kontrolované součásti právě pomocí rozpadu interferenčního obrazce při určité hladině mikro-nerovností. [25]

6 Etalony

Etalony představují esenciální nástroje v metrologii, které slouží jako referenční standardy pro realizaci, uchování a reprodukci hodnot měřených veličin. Z hlediska metrologické teorie se etalon definuje jako ztělesnění definice určité veličiny, která má stanovenou hodnotu a přidruženou nejistotu měření. Díky takovýmto standardům je možné zajistit konzistenci a srovnatelnost měření napříč všemi různými laboratořemi a průmyslovými odvětvími. Zvýší spolehlivost a srovnatelnost výsledků napříč globálním měřicím řetězcem. [31]

6.1 Klasifikace etalonů

V rámci metrologické hierarchie se etalony dělí do několika kategorií. Státní etalony představují nejvyšší úroveň realizace měřicí jednotky, přičemž jejich hodnota je přímo spojena s definicí veličiny. Referenční etalony jsou následnou realizací, kterou lze pravidelně kalibrovat vůči primárním etalonům. Kromě těchto dvou kategorií existují také pracovní etalony, které slouží ke každodennímu ověřování a kalibraci měřicích přístrojů v laboratorních a průmyslových podmínkách. Tato kategorizace umožňuje systematickou návaznost měření, což je nezbytné pro dosažení celkové srovnatelnosti výsledků [31]

6.2 Problematika etalonů

Přestože etalony představují základní kámen metrologické návaznosti, jejich udržení v optimálním stavu čelí řadě výzev. Mezi hlavní problémy patří vliv vnějších environmentálních podmínek, jako jsou teplota, vlhkost či vibrace, které mohou způsobit drobné změny v měřicích charakteristikách etalonu. Současný výzkum směřuje k optimalizaci konstrukčních řešení a zavádění automatizovaných kalibračních metod, které mají pomoci minimalizovat vliv vnějších faktorů a dále snížit nejistoty měření. [32, 33]

7 Přesnost měření.

Navzdory všem pokrokům v metrologii, které posouvají standardy přesnosti stále kupředu, není možné označit výsledky měření za zcela přesné. Důvodem je existence nejistot a chyb měření, které se vyskytují při každém použití měřicího přístroje. Chyba představuje odchylku mezi hodnotou získanou měřením a skutečnou hodnotou měřeného objektu. Nejistota vyjadřuje míru pochybností o výsledku měření. Pokud je to možné, snažíme se všechny známé chyby odstranit, například použitím korekcí uvedených v kalibračních certifikátech. Nejistota však vzniká z každé chyby, kterou nejsme schopni přesně určit. [34]

7.1 Nejistoty měření

Tento pojem vyjadřuje rozsah hodnot, ve kterém se s určitou mírou důvěry nachází skutečná hodnota měřené veličiny. Z pohledu metrologie je klíčové nejen uvádět samotné měřenou hodnotu, ale také kvantifikovat její možnou odchylku, čímž se zvyšuje transparentnost a reprodukovatelnost měření. [34, 35]

V literatuře se rozlišují dva základní typy – typ A, který vychází ze statistické analýzy opakovaných měření, a typ B, založený na ne-statistických odhadech, například z údajů o charakteristikách měřicího zařízení či kalibračních certifikátů [34]

Vyhodnocení nejistoty měření probíhá na základě kombinace statistických metod a odhadů založených na zkušenostech a charakteristikách používaných přístrojů. U statistických metod se jako základ často používá průměrná hodnota opakovaných měření, ze které se stanovuje směrodatná odchylka – klíčový ukazatel rozptylu měřených hodnot [34]. Na druhé straně, přístupy typu B zahrnují systematické chyby, jako jsou vlivy prostředí, drift měřicích přístrojů či metodologické odchylky, jež nelze přímo statisticky vyhodnotit. [35] Kombinací těchto přístupů se pak používá tzv. metoda kombinované nejistoty, kdy se jednotlivé přispívající chyby sčítají kvadraticky, čímž vzniká výsledná hodnota celkové nejistoty. [34]

7.2 Chyby měření

Měření je vždy ovlivněno různými typy chyb, jejichž důkladná analýza je klíčová pro zajištění přesnosti a spolehlivosti výsledků, což vyžaduje dodržování referenčních podmínek, opakované provádění měření a využívání statistických metod. Mezi tyto chyby patří systematické, náhodné a hrubé chyby. Systematické chyby vznikají z nedokonalostí

měřicího zařízení, metodických chyb či kalibračních odchylek, a proto lze jejich vliv do jisté míry kompenzovat pravidelnou kalibrací nebo korekčními postupy. Náhodné chyby odrážejí variabilitu měření způsobenou nepředvídatelnými vnějšími vlivy, jako je teplota či vlhkost, a drobnými odchylkami v obsluze, což se obvykle hodnotí pomocí statistických ukazatelů, zejména směrodatné odchylky. Hrubé chyby, často způsobené lidským faktorem nebo poruchou měřicí aparatury, představují výjimečné odchylky, které je nutné identifikovat a odstranit opakováním měření, aby nedošlo ke zkreslení celkových výsledků. [24]

8 Budoucnost metrologie

Trh s měřicími a diagnostickými technologiemi se neustále vyvíjí a představuje základ pro budoucnost metrologie. Díky rostoucím investicím do modernizace průmyslových zařízení a implementaci konceptů Průmyslu 4.0 vzrostla hodnota trhu již o 8,5 % v roce 2023 oproti roku předchozímu. Tato dynamika podporuje vývoj nových měřicích systémů, které umožňují přesnou kontrolu a diagnostiku v reálném čase. [36] Pokročilé měřicí technologie, jako je 3D měření, výpočtová tomografie či laserové skenování, výrazně zlepšují jakost kontroly výrobků. Integrace těchto metod s tvorbou digitálních dvojčat umožňuje přesnější a efektivnější sledování výrobních procesů. Automatizované systémy, měřicích robotů či kolaborativních zařízení, mohou snížit nutnost manuálního zásahu až o 45 %, čímž se výrazně zvyšuje produktivita a spolehlivost měření. [37]

Moderní technologie, jako jsou senzory, průmyslové kamery a analytické systémy, se stále více opírají o umělou inteligenci a strojové učení. Tyto inovace otevírají cestu k budoucí metrologii, kde se data využívají k prediktivní údržbě, optimalizaci výrobních procesů a udržitelné spotřebě energie. Integrace těchto technologií umožňuje vytvářet systémy, které jsou schopné adaptivně reagovat na měnící se požadavky na průmysl. [36] Moderní přístupy v oblasti kalibrace a správy dat umožňují elektronické podávání žádostí o kalibraci, což napomáhá rychlejší adaptaci měřicích postupů na nové legislativní požadavky a zvyšuje tím i jejich standardizaci. [37]

Pohled do budoucna ukazuje, že metrologie bude hrát klíčovou roli při zavádění komplexních digitálních ekosystémů v průmyslu. Propojováním pokročilých měřicích technologií s digitalizací a automatizací se otevírá prostor pro nové inovace, zvýšení jakosti a efektivity výrobních procesů a zároveň posílení environmentální odpovědnosti podniku. [36]

Dalším klíčovým prvkem budoucnosti metrologie je využití pokročilých bezdrátových technologií, jako je 5G, které umožňují rychlejší sběr a sdílení dat napříč celým výrobním řetězcem. Díky těmto inovacím se metrologie stává nedílnou součástí digitalizované výroby, podporuje udržitelný průmyslový růst a zvyšuje konkurenceschopnost podniků na úrovni globálního trhu. [37]

9 Závěr

Analyzované metody měření v oblasti metrologie představují komplexní soubor technik, jejichž správné využití je klíčové pro dosažení vysoké přesnosti a spolehlivosti výsledků. Práce se zaměřila na podrobný popis ručních metod měření, zejména mikrometrů a posuvných měřítek, kde byly rozebrány konstrukční principy, způsob čtení měřených hodnot a vlivy vnějších podmínek, jako je teplota a způsob uchycení přístroje. Uvedené mechanismy a doporučené postupy zdůrazňují význam precizního nastavení a pravidelné kalibrace, které jsou nezbytné pro minimalizaci měřicích chyb a zajištění opakovatelnosti výsledků. Dodržování praktických pravidel, například při výběru vhodného modelu měřidla, správné manipulaci s přístroji či údržbě, je základem pro dosažení co nejvyšší měřicí spolehlivosti a opakovatelnosti.

Strojní metody měření, jako jsou souřadnicové měřicí stroje (CMM) a výpočetní tomografie (CT), představují moderní přístupy měření, které umožňují automatizované, velmi přesné a rychlé získávání měřicích dat. CMM jsou schopny zachytit tisíce bodů na povrchu měřených dílů, což umožňuje detailní analýzu geometrie a odhalování drobných odchylek. Přestože kontaktní metody poskytují vysokou přesnost, kombinace s bezkontaktními technikami, které eliminují riziko deformace měřených objektů, nabízí vyšší flexibilitu a adaptabilitu v různých měřicích podmínkách. CT využívá rentgenové paprsky k získání trojrozměrného modelu vnitřní struktury dílů, což je neocenitelné zejména při analýze materiálových vlastností a detekci skrytých vad. Přesnost této metody závisí na kvalitě rekonstruovaných dat a pečlivě nastavených kalibračních postupech.

Další kapitola práce se věnuje měření povrchu, kde je kladen důraz na stanovení drsnosti, jakožto klíčového parametru ovlivňujícího funkčnost i estetiku finálních výrobků. Popsány jsou jak kontaktní metody, tak moderní bezkontaktní techniky, které umožňují přesnou charakterizaci povrchových nerovností. Správné nastavení měřicího přístroje, volba vhodných senzorů a implementace kalibračních metod přispívají k eliminaci měřicích nejistot a zvyšují kvalitu výsledných dat. Kombinace různých měřicích přístupů tak umožňuje získat ucelený obraz měřeného objektu, což je klíčové pro kontrolu jakosti a optimalizaci výrobních procesů.

Celkově práce ukazuje, že moderní metrologické metody představují synergii tradičních a digitálních přístupů, jejichž integrací je možné dosáhnout velmi vysoké úrovně přesnosti a efektivity. Analýza jednotlivých metod poukazuje na to, že každý měřicí přístroj má své specifické přednosti a omezení, a proto je vhodné volit metodu odpovídající konkrétním potřebám měření. Důležitým aspektem je rovněž pravidelná údržba a kalibrace měřicích zařízení, což zaručuje dlouhodobou spolehlivost a minimalizaci systematických chyb.

Budoucnost metrologie se pravděpodobně bude ubírat směrem ke stále větší integraci různých technologií. Multisenzorové přístupy, kombinace optických, dotykových a laserových měřicích metod společně s pokročilými softwarovými nástroji, otevírají nové možnosti pro automatizaci a optimalizaci měřicích procesů. Takovýto přístup umožní nejen zvýšení přesnosti měření, ale také efektivnější zpracování dat a snadnější integraci do průmyslových systémů pro kontrolu kvality. Inovace v této oblasti tak představují klíčový faktor pro zvýšení konkurenceschopnosti a kvality výrobních procesů.

Závěrem lze konstatovat, že analýza současných metod měření potvrzuje význam pečlivého výběru a správného nastavení měřicích zařízení. Spolupráce mezi tradičními ručními metodami a moderními strojními přístupy přináší komplexní řešení, která odpovídají nárokům současného průmyslu. Hlavní je také podotknout, že pro měření neexistuje jedna správná metoda, vše se odvíjí od možností měřitele a od požadovaných parametrů měření. Dosažené poznatky a doporučené postupy mohou sloužit jako vodítko pro další rozvoj metrologických technik a přispět k optimalizaci měřicích procesů v budoucnosti.

10 Seznam použitých zdrojů

- [1] Třípól – Magazín plný pozitivní energie. Z historie měření [online]. 10. února 2017. [cit. 2025-1-14]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/fyzika-a-klasicka-energetika/1964-z-historie-mereni>
- [2] ELUC – Elektronická učebnice. Historie metrických soustav [online]. [cit. 2025-1-14]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/historie-metrickych-soustav>
- [3] Encyklopedie Prahy 2. Etalon – Novoměstská radnice, Vodičkova čp. 11 [online]. [cit. 2025-1-14]. Dostupné z: <https://encyklopedie.praha2.cz/pametni-deska/281-etalon-novomestska-radnice-vodickova-cp-11>
- [4] MICROTECH Tools. Katalog MICROTECH 2025 [online]. 2025. [cit. 2025-2-20]. Dostupné z: https://microtech.tools/wp-content/uploads/2024/12/MICROTECH_CATALOG_2025.pdf
- [5] BROŽEK, Milan. Strojírenská technologie II: návody ke cvičením. Vyd. 2. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2014. ISBN 978-80-213-2435-0.
- [6] iKap. Měření mikrometrem [online]. [cit. 2025-2-20]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/mereni-mikrometrem>
- [7] MITORO. Metrologická příručka [online]. [cit. 2025-2-21]. Dostupné z: <https://mitoro.cz/ke-stazeni/metrologicka-prirucka.pdf>
- [8] ELUC. Měření vnějších rozměrů [online]. [cit. 2025-2-21]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/mereni-vnejsich-rozmeru>
- [9] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA, ed. Coordinate measuring machines and systems. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016]. Manufacturing engineering and materials processing. Dostupné z: doi:9780429114229
- [10] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti – opticky, dotykově a rentgenovou tomografií. 4. přeprac. a rozš. vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčík, 2008.
- [11] RADHAKRISHNAN, P. (2014). Computer Numerical Control Machines And Computer Aided Manufacture. London: New Academic Science
- [12] RENISHAW. (n.d.). Přesné doteky pro metrologii. [cit. 2025-2-21]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/cs/presne-doteky-pro-metrologii--47746?srsId=AfmBOoqWjfEpheN7p9gW9D2Fau4T7nXyteMmoAj2Fgof3VjzyI-lhfmw>
- [13] HEXAGON. FIVE U-nique fixturing system [online]. [cit. 2025-3-2]. Dostupné z: <https://hexagon.com/products/five-u-nique-fixturing-system?accordId=B0ADD910DF0B47C2862A94BD5EDDCAB8#>

- [14] Tomografie. Nzip.cz [online]. [cit. 2025-3-5]. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/rejstrikovy-pojem/3308>
- [15] CHRISTOPH, R. a NEUMANN, H. J. Rentgenová tomografie v průmyslové měřicí technice. Praha: Süddeutscher Verlag onpact GmbH, 2011.
- [16] AUTOMA. Multisenzorový souřadnicový stroj Werth Tomoscope HV 500 [online]. 2011, červenec. [cit. 2025-3-5]. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/multisenzorovy-souradnicovy-stroj-werth-tomoscope-hv-500-2011_07_44094_5622/
- [17] ENGINEERING. Průmyslové CT: řešení pro náročné aplikace [online]. [cit. 2025-3-5]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/3424-prumyslove-ct-reseni-pro-narocne-aplikace>
- [18] INEWS CAMOSCI. Rentgenka: její stavba a funkce [online]. [cit. 2025-3-14]. Dostupné z: <https://inews.camosci.cz/clanky/technologie/?i=rentgenka-jeji-stavba-a-funkce-318>
- [19] MMSpektrum. Multisenzorová technologie a počítačová tomografie [online]. [cit. 2025-3-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/multisenzorova-technologie-a-pocitacova-tomografie>
- [20] ACCRETECH (Europe) GmbH. Surface measuring [online]. [cit. 2025-2-25]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/en/surface-measuring/>
- [21] M&B Calibr, spol. s r.o. Měření drsnosti [online]. [cit. 2025-2-25]. Dostupné z: <https://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [22] ČSN EN ISO 21920-2 (014450) A Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil. Část 2, Termíny, definice a parametry textury povrchu = Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile. Part 2, Terms, definitions and surface texture parameters. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [23] EVIDENT SCIENTIFIC. Surface roughness measurement portal – parameters [online]. [cit. 2025-2-24]. Dostupné z: <https://evidentscientific.com/en/applications/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters#001>
- [24] TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [25] PROINEX s.r.o. Měření drsnosti povrchu – drsnoměry, profiloměry [online]. [cit. 2025-2-28]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/a/mereni-drsnosti-povrchu-drsnomery-profilomery>
- [26] AT Machining. Surface finish chart. [online]. [cit. 2025-2-26]. Dostupné z: <https://at-machining.com/surface-finish-chart>

- [27] JD DVOŘÁK, S.R.O. Metody 3D měření [online]. [cit. 2025-2-24]. Dostupné z: <https://www.jddvorak.cz/>
- [28] LAUFER, Gabriel. Introduction to optics and lasers in engineering. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-45233-3.
- [29] TECHMANIA SCIENCE CENTER. Interference světla. Eduportál Techmania [online]. Dostupný z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/interference-svetla>.
- [30] LIGO CALTECH. Interference water parallels light [online image]. – [cit. 2025-3-20]. Dostupné z: https://www.ligo.caltech.edu/system/media_files/binaries/269/original/interference_water_parallel_light.jpg?1448052998
- [31] Metrologie v kostce: projekt EUROMET č. 595: české vydání s doplňky a poznámkami. Praha: Sdělovací technika, 2002. ISBN 80-86645-01-0.
- [32] Stürmer, J., Seifahrt, A., Schwab, C. a Bean, J. L. (2016). Rubidium-traced white-light etalon calibrator for radial velocity measurements at the cm/s level [online]. arXiv:1607.05172. [cit. 2025-3-11]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1607.05172>
- [33] Jennings, J., Halverson, S., Terrien, R., Mahadevan, S., Ycas, G. a Diddams, S. A. (2017). Frequency stability characterization of a broadband fiber Fabry–Perot interferometer [online]. arXiv:1703.00001. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1703.00001>
- [34] ESSCOLAB. Measurement guide [online]. [cit. 2025-3-11]. Dostupné z: <https://www.esscolab.com/uploads/files/measurement-guide.pdf>
- [35] UNMZ. Nejistoty [online]. [cit. 2025-3-12]. Dostupné z: https://unmz.gov.cz/sborniky_th/sb8/nejistoty.pdf
- [36] MÁLEK, Michael. Diagnostika a měření na vzestupu [online]. 2024, 1 [cit. 2025-2-14]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/blog/diagnostika-a-mereni-na-vzestupu_60307.html
- [37] První ročník konference Digitální budoucnost českého průmyslu a její dopady do odvětví metrologie [online]. [cit. 2025-2-14]. Dostupné z: <https://www.reportazezprumyslu.cz/prvni-rocnik-konference-digitalni-budoucnost-ceskeho-prumyslu-a-její-dopady-do-odvetvi-metrologie>