



**PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE**
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



**EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA**
SPOLOČNE BEZ HRANÍC

Žilinská univerzita v Žiline

a

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

STROJÁRSKA METROLÓGIA A KVALITA POVRCHOV VYTVORENÝCH TECHNOLOGIAMI OBRÁBANIA

autori

Ing. Mário Drbúl, Ph.D.

Ing. Michal Šajgalík, Ph.D.

Ing. Ján Šemcer, Ph.D.

Ing. Tatiana Czánová, Ph.D.

Ing. Lenka Petřkovská, Ph.D.

Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Žilina

2014

Oponent: prof. Ing. Peter Demeč, CSc.

Názov: Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania

Autori: Mário DRBÚL, Michal ŠAJGALÍK, Ján ŠEMCER, Tatiana CZÁNOVÁ, Lenka PETŘKOVSKÁ, Lenka ČEPOVÁ,

Vydanie: prvé, 2014

Počet stran: 115

Náklad: 100 ks

Vydavateľ a tisk: ŽU v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra obrábania a výrobnjej techniky

Študijné materiály pre vzdelávanie pracovníkov z praxe

Jazyková korektúra: nebola prevedená.

Určené pre projekt:

OPERAČNÝ PROGRAM CEZHRANIČNEJ SPOLUPRÁCE SLOVENSKÁ REPUBLIKA -
ČESKÁ REPUBLIKA 2007 - 2013

Prioritná os: 1. Podpora sociokultúrneho a hospodárskeho rozvoja cezhraničného
regiónu a spolupráce

Oblasť podpory: 1.3 Vzdelávanie, trh práce a zamestnanosť

Názov: Podpora zvyšování kvalifikace pracovní síly v oblasti moderních technologií
obrábění a metrologie

Číslo: ITMS 22410320051

Hlavný partner: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava

Hlavný cezhraničný partner: Žilinská univerzita v Žiline

© Mário DRBÚL, Michal ŠAJGALÍK, Ján ŠEMCER, Tatiana CZÁNOVÁ, Lenka PETŘKOVSKÁ,
Lenka ČEPOVÁ, 2014

© Žilinská univerzita v Žiline

ISBN

ÚVODNÉ SLOVO

Hlavným cieľom projektu je podpora zvyšovania kvalifikácie pracovných síl - pracovníkov strojárenských firiem. Za účelom naplnenia cieľa, bude vytvorený slovensko-český tím odborníkov z oblasti progresívnych metód obrábania a metrologie, ktorého cieľom bude poskytovať odborné poznatky formou vzdelávacích školení pre pracovníkov strojárenských firiem pôsobiacich na slovensko - českom pohraničí. Zvýšením kvalifikácie pracovnej sily dôjde k nárastu počtu odborníkov práve v oblasti strojárenskej výroby a zvýši sa tak konkurencieschopnosť daných firiem obstať na trhu podnikania. Absolventi vzdelávacích školení budú vybavení inovačnými znalosťami progresívnych metód obrábania, metrologie a pokročilých metód kontroly kvality súčasti po obrobení. Preškolení účastníci si zvýšia svoju kvalifikáciu a budú mať širšie možnosti uplatnenia na trhu práce.

Predložený vzdelávací program je zameraný na metódy hodnotenia kvality obrobeného povrchu súčastí vytvoreného progresívnymi metódami obrábania (vysokoproduktívne obrábanie - HPM (High Productive Machining)), ktoré sú aplikované v technickej praxi. Je to jedna z popredných progresívnych metód, ktorá umožňuje obrábať rôzne druhy ťažko-obrobiteľných materiálov s dôrazom na vyššiu efektívnosť a kvalitu výroby.

Keďže sa jedná v danom prípade hlavne o tvarovo náročné plochy priestorovo nepravidelných tvarov, počas obrábania dochádza k tepelnému ovplyvneniu povrchu i celého obrobku, čo je potrebné kontrolovať, ako aj robiť celkovú rozmerovú, tvarovú i kvalitatívnu kontrolu povrchu, čo nie je možné klasickými meracími prístrojmi, ale je nutné na to použiť aj vhodne zvolené meracie prístroje a vedieť ich ovládať a štatisticky spracovať výsledky týchto meraní."

Z hľadiska výroby má zásadný význam poznanie mechanizmu, resp. technologických procesov, pri ktorých vzniká nový povrch súčastky, pretože len tak je možné pochopiť povahu a vlastnosti vytvoreného povrchu. Na základe získaných informácií možno potom lepšie zdokonaľovať použité procesy či vytvárať obrobené plochy, ak nie s nulovým, tak aspoň minimálnym počtom porúch. Vlastnosti a správanie sa materiálu v určitých podmienkach závisia od vlastností obrobeného povrchu, ktoré určuje integrita povrchu.

Neustále sa zvyšujúca konkurencia a rastúce požiadavky na čoraz kvalitnejšie a presnejšie výrobky s minimálnymi výrobnými nákladmi za čo najkratšiu dobu, nútia výrobcov obzerať sa a hľadať nové možnosti. Používanie nových rezných materiálov aplikovateľných pri vysokých rezných rýchlostiach negatívne ovplyvňuje integritu povrchu prostredníctvom mikrogeometrie a plastických deformácií. Ďalším problémom, ktorý je nutné vyriešiť v oblasti obrábania vysokými reznými rýchlosťami je tepelné ovplyvnenie obrábaného materiálu. Hoci na kvalitu obrobeného povrchu má najväčší vplyv posledná operácia, aj pri zle zvolenom postupe však môžu v povrchových a podpovrchových vrstvách obrábaného materiálu ostať poruchy z prvých operácií, ktoré už neskoršími technologickými operáciami ide len ťažko odstrániť.

Správne zvolené metódy kontroly obrobeného povrchu súčastí nám pomáhajú jednoznačne identifikovať ich vzniknuté nedostatky a tým znížiť cenu výrobku a zvýšiť jeho kvalitu.

OBSAH

Soznam použitých symbolů a značek	6
1 ÚVOD	11
2 INTEGRITA POVRCHU	12
2.1 Zvyškové napätie.....	12
2.1.1 Metódy merania zvyškových napätí	17
2.1.1.1 Mechanické metódy	18
2.1.1.2 Fyzikálne metódy	19
2.1.1.3 Nepriame metódy.....	26
2.1.2 Analýza integrity povrchu	26
2.2 Geometrické parametre súčiastok.....	27
2.2.1 Základné pojmy	30
2.2.2 Geometrické tolerovanie.....	31
2.2.2.1 Geometrické tolerancie tvaru	33
2.2.2.2 Tolerovanie orientácie.....	38
2.2.2.3 Tolerovanie polohy.....	39
2.2.2.4 Tolerovanie hádzania	40
2.2.2.5 Označovanie geometrických tolerancií	42
2.2.2.6 Meranie vybraných geometrických odchýlok	43
2.3 Parametry a měření drsnosti povrchu	47
2.3.1 Parametry drsnosti povrchu	48
2.3.2 Parametry charakterizující nerovnosti profilu ve směru výšky	51
2.3.3 Parametry charakterizující nerovnosti profilu v podélném směru	53
2.3.4 Parametry charakterizující tvar nerovnosti profilu	53
2.3.5 Křivky a odpovídající profily	53
2.3.5 Meracie systémy pre kontrolu drsnosti povrchu	54
2.3.6 Dotyková profilová metóda	54
2.3.6.1 Vplyv meracej sily hrotu dotykového prístroja	55
2.3.6.2 Voľba podmienok merania pri profilovej metóde	55
2.3.6.3 Kontaktné (dotykové) prístroje	55
2.3.7 Metóda bezdotyková	59
2.3.7.1 Bezdotykové prístroje.....	59
3 ZÁKLADY MERANIA NA SMS	62
3.1 Stacionárne kontrolné systémy	63
3.1.1 Geometrické rozdelenie stacionárnych súradnicových meracích strojov	65
3.2 Multisenzorové súradnicové meracie stroje	67
3.2.1 Počítačová tomografia (metrotomografia).....	68
3.2.2 Snímacie dotyky pre SMS	69
3.2.2.1 Senzor spracovania obrazu	74
3.2.2.2 CCD kamera (Charge Coupled Device).....	74
3.2.2.3 Laserový senzor	76
3.2.3 Typy snímacích hláv a ich vplyv na meranie.....	77
2.2.1 Spôsoby merania na súradnicových meracích strojoch.....	79
3.3 Mobilné meracie systémy	80
3.3.1 Programy pre obsluhu a riadenie súradnicových meracích strojov	81
3.3.2 Kontrola v pracovnom priestore obrábacieho centra	82
3.3.2.1 Systémy pre kontrolu nástrojov.....	83
3.3.2.2 Meracie sondy.....	83
3.4 Počítačová simulácia kontroly výrobkov.....	85
3.4.1 Programovanie merania u súradnicových meracích strojov	85
3.4.2 Štandardy programovania u meracích strojov s využitím CAD systémov	87
3.4.3 Výhody offline programovania.....	88
3.5 Presnosť merania u súradnicových meracích strojov	88
3.5.1 Chyby merania	89
3.5.2 Vplyvy chýb na výsledok merania	92
3.5.2.1 Chyby snímania u súradnicového meracieho stroja	93
3.5.3 Druhy kontaktných bodov	94
3.6 Meracie sondy – zakončenie hortu dotyku	96
3.6.1 Pracovanie údajov vo výrobe	99
3.7 CAD vyhodnotenie merania.....	100

4	3D POVRCH - TOPOGRAFIE POVRCHU	102
4.1	Prostorové hodnocení struktury povrchu.....	103
4.2	Rozbor 3D textury povrchu.....	103
4.3	Parametry k vyhodnocení 3D povrchu	104
4.4	Charakteristika vlastností povrchu.....	107
4.5	4D – progresivní analýza změn textury povrchu	108
4.6	Využití prostorového vyhodnocení textury povrchu v praxi.....	109
	ZÁVER.....	110
	LITERATÚRA.....	111

Seznam použitých symbolov a značiek

Symbol	Význam	Jednotka
A	Primárna základňa, plocha, piemer guľôčky	-, [mm ²], [mm]
A	Konštanta udávaná výrobcom	[μm]
a	Indikovaný bod merania	
a	Indikovaný bod merania	-
AC	Zdroj energie	-
B	Sekundárna základňa, celková dĺžka dotyku	-, [mm]
b	Korekčný vektor zakončenia dotykového hrotu	-
C	Terciálna základňa, priemer drieku dotyku	-, [mm]
c	Korigovaný bod merania	-
CAD	Počítačom podporované konštruovanie	-
CCD	Kamerový senzor	-
CCI	Optická snímacia jednotka	-
D	Priemer otvoru, hriadeľa, efektívna činná dĺžka	[mm]
d	Vzdialenosť kryštalografických rovín	[nm]
d	Cieľový bod dotyku, vektor korigovaného bodu merania	-
d _v	Dolná medzná odchýlka	[mm]
\vec{D}	Vektor indikovaného bodu merania	-
E	Podmienka obalovej plochy	-
e	Skutočný bod dotyku, vektor indikovaného bodu merania	-
EWL	efektívna činná dĺžka dotyku	[mm]
f	Skutočný prvok	-
FWHM	Full width at half maximum – plná šírka pri polovičnej výške	-
g	Nominálny prvok, celková skenovacia čiara	-
GPS	Geometrické špecifikácie a verifikácie výrobkov	-
h	Čas	[s ⁻¹]
h _v	Horná medzná odchýlka	[mm]
K	Konštanta vodivosti materiálu	-
K	Bezrozmerná kladná konštanta udávaná výrobcom	-
k _r	Koeficient rozšírenia	-
L	Podmienka minima materiálu	-
L	Meraný rozmer	[mm]

Symbol	Význam	Jednotka
In	Vyhodnocovaná dĺžka	[mm]
Ir	Základná dĺžka	[mm]
LSCI	Gaussová kompenzačná kružnica	-
LSCY	Gaussov kompenzačný valec	-
LSS	Stredná čiara (rovina) preložená metódou najmenších štvorcov	-
M	Menovitý rozmer, podmienka maxima materiálu	[mm]
m	Stredná čiara profilu	[mm]
MCCI	Minimálny opísaná kružnica	-
MCCY	Minimálna opísaný valec	-
MICI	Maximálna vpísaná kružnica	-
MICY	Maximálny vpísaný valec	-
MI	Dĺžka materiálu elementu profilu	[mm]
MPE _E	Najväčšia dovolená chyba CMM pri meraní	[µm]
MPE _{THP}	Najväčšia dovolená chyba kontaktného snímania	[µm]
MZCI	Minimálna radiálna vzdialenosť	-
MZCY	Minimálna radiálna vzdialenosť	-
MZS	Minimálna zóna medzi dvomi priamkami (rovinami)	-
\vec{M}	Vektor korigovaného bodu merania	-
n	Počet meraných úsekov	-
OC	Orábacie centrum	-
P	Primárny profil	-
PC	Počítač	-
R	Drsnosť povrchu	[µm]
R	Podmienka reciprocity	-
Ra	Stredná aritmetická odchýlka posudzovaného profilu na základnej dĺžke	[µm]
R _m	Medza pevnosti materiálu	[MPa]
R _{mr}	Materialový podiel profilu	[%]
R _p	Výška najväčšieho výstupku profilu	[µm]
R _{p0,2}	Dohodnutá medza sklzu materiálu	[MPa]
R _{sk}	Koeficient asymetrie posudzovaného profilu	-
R _{Sm}	Priemerná šírka prvku profilu	[mm]
RTG	Röntgenové žiarenie	[R]
R _v	Hĺbka najväčšej priehlbiny profilu	[µm]

Symbol	Význam	Jednotka
Rz	Najväčšia dĺžka profilu na základnej dĺžke	[μm]
R Δ q	Priemerný kvadratický sklon posudzovaného profilu	-
Rpk	Redukovaná výška výstupku profilu	[μm]
Rk	Výška jadra profilu drsnosti	[μm]
Rvk	Redukovaná hĺbka výstupku profilu	[μm]
S	Guľová plocha	[mm^2]
SMS	Súradnicový merací stroj	-
SPC	Počítačom podporovaná kvalita	-
Spk	Redukovaná výška píku	[μm]
Sk	Výška jadra	[μm]
Svk	Redukovaná hĺbka priehĺbeniny	[μm]
Smr1	Pomer materiálu	[%]
Smr2	Pomer materiálu	[%]
T	Tolerančné pole	[mm]
t	Tolerančná zóna	[mm]
U	Rozšírená neistota	[μm]
u	Štandardná neistota	[μm]
u_{Ay}	Štandardná neistota typu A,	-
u_{By}	Štandardná neistota typu B.	-
u_{Cy}	Kombinovaná a rozšírená neistota	-
Vmp	Pík objemu materiálu obmedzený stupnicou povrchu	[ml.m^{-2}]
Vmc	Jadro objemu materiálu obmedzený stupnicou povrchu	[ml.m^{-2}]
Vvc	Neplatný objem jadra obmedzený stupnicou povrchu	[ml.m^{-2}]
Vvv	Neplatný objem priehĺbeniny obmedzený stupnicou povrchu	[ml.m^{-2}]
VV	Virtuálna priehĺbenina profilu	[μm]
W	Vlinitosť povrchu	[μm]
X1	Súradnica v smere osi x	[mm]
X-ray	Röntgenové žiarenie	[R]
Xs	Šírka prvku profilu	[mm]
Y1	Súradnica v smere osi y	[mm]
Z(X)	Hodnota súradnice	[mm]
Z1	Súradnica v smere osi z	[mm]
Zp	Výška výstupku profilu	[μm]
Zv	Hĺbka priehĺbiny profilu	[μm]

Symbol	Význam	Jednotka
α	Uhol usporiadania oporných bodov	[°]
β	Uhol náklonu rtg. lampy meracieho prístroja protoxrd	[°]
γ	Odchýlka tvaru	[mm]
ε	Pomerné predĺženie	-
θ	Uhol difrakčného kužela	[°]
λ	Vlnová dĺžka	[mm]
v_j	Odchýlka od menovitého rozmeru	[mm]
σ	Normálové zvyškové napätie	[MPa]
τ	Tangenciálne (šmykové) zvyškové napätie	[MPa]
λ_c	Vlnová dĺžka pre drsnosť	[mm]
λ_f	Vlnová dĺžka pre vlnitosť	[mm]
\vec{T}	Korekčný vektor zakončenia dotykového hrotu	-

Soznam použitých ikon



Potrebné si zapamätat'



Anglické označenia a zkratky



Poznámka



Experimenty



Praktické použitie



Výhody



Nevýhody



Princíp metody



Parametry metody



Použitie metody



Porovnaní metody



Literatúra



Odkaz na kapitolu



Pozor na odlišnosť

1 ÚVOD

Z hlediska výroby má zásadný význam poznání mechanismu, resp. technologických procesů, při kterých vzniká nový povrch součástky, protože jen tak je možné pochopit povahu a vlastnosti vytvořeného povrchu. Na základě získaných informací možno potom lépe zdokonaľovat použité procesy či vytvářat obrobené plochy, ak nie s nulovým, tak aspoň minimálnym počtom porúch. Vlastnosti a správanie sa materiálu v určitých podmienkach závisia od vlastností obrobeného povrchu, ktoré určuje integrita povrchu. [81]

Integritu povrchu je možné chápať ako vzťah medzi geometrickými vlastnosťami povrchu a fyzikálnymi vlastnosťami materiálu, ako napr. mikroštruktúra materiálu, zvyškové napätia, tvrdosť a pod. Zároveň odráža podmienky, pri ktorých vzniká obrobený povrch, pričom do úvahy je potrebné brať dôsledky použitých technologických operácií.

Integrita povrchu predstavuje jeden z najväčších problémov v súčasnej strojárkej výrobe. Súčasné trendy technológie obrábania, predovšetkým dokončovacie operácie úzko súvisia s funkčnými vlastnosťami povrchu. [19]

Neustále sa zvyšujúca konkurencia a rastúce požiadavky na čoraz kvalitnejšie a presnejšie výrobky s minimálnymi výrobnými nákladmi za čo najkratšiu dobu, nútia výrobcov obzerať sa a hľadať nové možnosti. Používanie nových rezných materiálov aplikovateľných pri vysokých rezných rýchlostiach negatívne ovplyvňuje integritu povrchu prostredníctvom mikrogeometrie a plastických deformácií. Ďalším problémom, ktorý je nutné vyriešiť v oblasti obrábania vysokými reznými rýchlosťami je tepelné ovplyvnenie obrábaného materiálu. Hoci na kvalitu obrobeného povrchu má najväčší vplyv posledná operácia, aj pri zle zvolenom postupe však môžu v povrchových a podpovrchových vrstvách obrábaného materiálu ostať poruchy z prvých operácií, ktoré už neskoršími technologickými operáciami ide len ťažko odstrániť. [4]

Z hľadiska bežných kontrol (tvrdosť, drsnosť, geometrické odchýlky) sa síce môže povrchová vrstva javiť ako konzistentná, avšak meranie distribúcie zvyškových napätí odhalí skutočnú kvalitu obrobenej plochy. Z publikovaných vedeckých štúdií však aj pri zvyškových napätiach možno vysloviť len všeobecný záver, že ťahové zvyškové napätia ovplyvňujú negatívne únavovú pevnosť, zatiaľ čo tlakové zvyškové napätia ju zvyšujú. Je potrebné uviesť, že ich účinok nie je rovnocenný a aplikovanie tohto tvrdenia na konkrétnu súčiastku si vyžaduje overenie a starostlivý prístup. [81]

2 INTEGRITA POVRCHU

Hotový výrobek s požadovaným tvarom prejde v rámci výrobného procesu rôznymi technologickými operáciami. Od výroby vhodného polotovaru pre konkrétnu súčiastku, až po dokončovacie operácie nesie štruktúra materiálu v sebe informácie o použitých technológiách. Tieto informácie sa navonok prejavujú ako mechanické a fyzikálne vlastnosti súčiastky vplývajúce na jej funkčnosť a životnosť.

Súbor vlastností povrchovej vrstvy, ktoré sú ovplyvnené technologickými procesmi a u ktorých sa predpokladá vplyv na funkčné vlastnosti súčiastky možno podľa Ganeva [11] zjednotiť pojmom integrita povrchu. Medzi najvýznamnejšie a najčastejšie analyzované faktory, ktoré charakterizujú integritu povrchu po obrábaní patria:

- mikrogeometria obrobeného povrchu;
- stupeň a hĺbka spevnenia;
- štruktúrne fázové a chemické zmeny;
- zmysel, veľkosť a hĺbkový profil zvyškových napätí. [11]

2.1 Zvyškové napätie

Ako už bolo spomenuté vyššie, všetky technologické operácie počas výrobného procesu sa prejavujú v materiáli. Bez ohľadu na charakter daných operácií (beztrieskové, resp. trieskové) sú takmer všetky založené na silovom pôsobení.

Pôsobením vonkajších síl sa materiál deformuje, tvarovo mení a v medznom prípade môže dôjsť až k jeho porušeniu. Veľkosť deformácie je výsledkom vzájomného pôsobenia vonkajších a vnútorných síl, ktoré deformácii bránia. Vnútorné sily sú dané vzájomným silovým pôsobením štruktúrnych častíc a zodpovedajú príslušnej štruktúre (kryštálovej mriežke) materiálov. Vlastnosti a správanie sa materiálov v oblasti elastických deformácií sú rozhodujúce pre pevnostné výpočty (tzv. konštrukčné účely), zatiaľ čo vlastnosti a správanie materiálov v oblasti plastických deformácií sú rozhodujúce pre technologické účely, pri ktorých sa cielene mení tvar a rozmery súčiastok. Napätostný stav materiálu po odstránení všetkých vonkajších síl možno charakterizovať ako zvyškové napätia v materiáli. [37]

Zvyškové napätia môžu vzniknúť pod obrobeným povrchom len vtedy, ak dôjde v povrchovej vrstve k plastickej deformácii. Ich vznik je spojený práve s použitými technologickými operáciami vo výrobnom procese a ich pôsobenie a charakter predovšetkým v povrchových vrstvách má zásadný vplyv na kvalitu obrobeného povrchu, vznik trhlín a korózie a v konečnom dôsledku na funkčnosť a životnosť súčiastky. [37]



Potrebné si zapamätáť

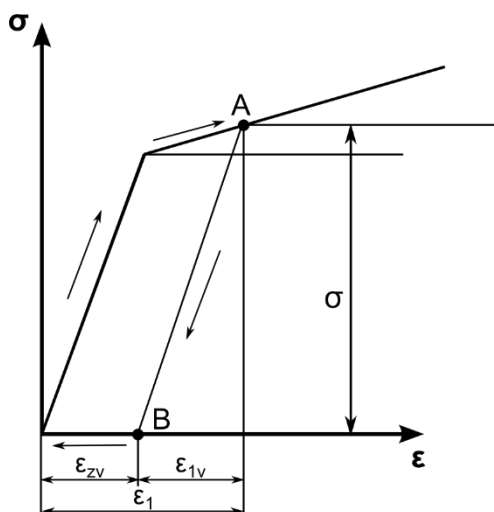
Zvyškové napätia vznikajú len vtedy, pokiaľ v povrchovej vrstve dôjde k plastickej deformácii.

Zvyškové napätia, ktoré sa môžu vyskytovať v uzavretých systémoch možno rozdeliť podľa rôznych hľadísk. Zvyškové napätia môžu byť ťahové (majú kladný zmysel, a pôsobia smerom z materiálu) a tlakové (majú záporný zmysel a pôsobia smerom do materiálu).

Podľa Bátoru [3], charakter zvyškového napätia závisí od toho ako k deformácii došlo:

Zvyškové napätia vzniknuté nerovnomernou plasticou deformáciou vyvolanou silovým účinkom nástroja sú charakteristické pre technologické procesy, pri ktorých dochádza k plastickej pretvárneniu povrchovej vrstvy, pričom materiál jadra je len pružne deformovaný. Vo väčšine prípadov, nedochádza k zásadnému tepelnému ovplyvneniu, takže obrábaný povrch je plastickej deformovaný len vplyvom tlaku nástroja. Po skončení procesu sa pružne deformované vrstvy snažia zaujať pôvodnú polohu a pôsobia tlakom späť na vrchnú plastickej deformovanú vrstvu, čím vyvolávajú tlakové zvyškové napätia.

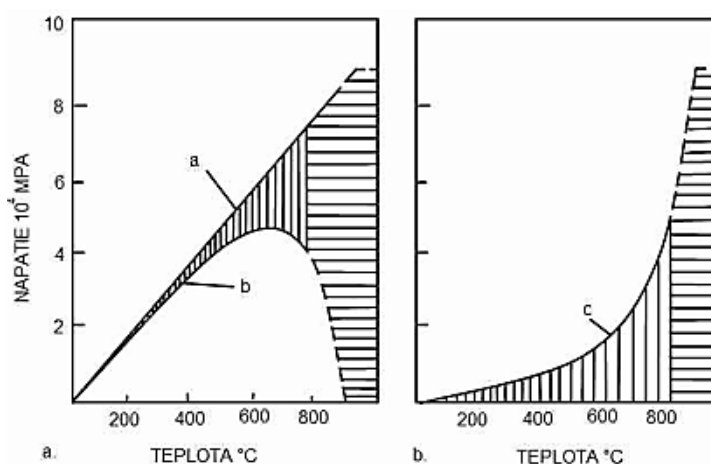
Podstatu vzniku týchto napätí možno opísať pomocou zjednodušeného pracovného diagramu väčšiny konštrukčných materiálov. Možno vidieť, že ak zaťaženie presiahne medzu sklzu, po odľahčení deformácia neprebíha podľa pôvodnej krivky, ale po krivke, ktorá je rovnobežná s priamkovou časťou čiary reálneho diagramu obr.1.



Obr. 1. Zjednodušený pracovný diagram materiálu s vyznačením trvalej deformácie [3]

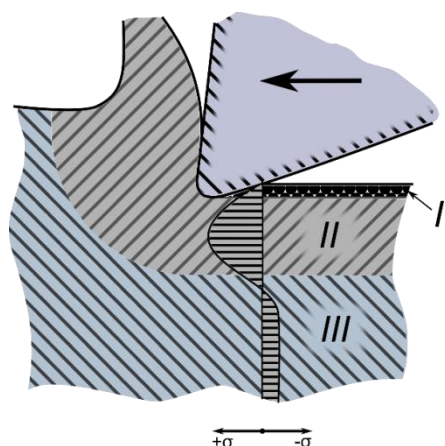
Zvyškové napätia spôsobené nerovnomerným teplotným ovplyvnením (tzv. termonapätia) vznikajú, ak je súčiastka nerovnomerne ohriata, alebo ochladzovaná. Ak by pri zahrievaní materiálu bol modul pružnosti konštantný, nárast vnútorných napätí by prebiehal podľa čiary a na Obr. . Pretože modul pružnosti sa mení vplyvom teploty, rast

vnútorných napätí prebieha v skutočnosti podľa čiary b na Obr. 2. Pri chladnutí v povrchovej vrstve dôjde k jej zmršťovaniu, k jej plastickej deformácii a vzniku ťahových vnútorných napätí, ktoré sú väčšie ako vnútorné tlakové napätia vznikajúce pri ohreve, lebo modul pružnosti ochladenej vrstvy je väčší ako modul pružnosti v ohriatom stave. Rozdiel hodnôt vnútorných napätí pri ochladení a ohreve (krivka a, resp. b na Obr. 2) určuje hodnotu tepelných zvyškových ťahových napätí v povrchovej vrstve (krivka c na Obr. 2).



Obr. 2 Mechanizmus vzniku tepelných zvyškových napätí v obrobenom povrchu [3]

Zvyškové napätia, ktoré vzniknú nerovnomernou fázovou transformáciou, alebo vylučovaním nových štruktúrnych zložiek sú charakteristické predovšetkým pre technologicke operácie sústruženia, frézovania, preťahovania a pod. Pri objasňovaní konkrétnych technologických príčin vzniku zvyškových napätí treba zohľadniť predovšetkým pôsobenie rezného klinu nástroja, ktorý nie je ideálne ostrý, čím neodreže celú nastavenú hrúbku, ale časť zatlačí do obrobeného povrchu. Z fyzikálneho hľadiska dochádza k plastickej deformácii, kedy klesá hustota obrábaného materiálu a rastie merný rezný objem. Pri zvýšení merného objemu v povrchovej vrstve vznikne tlakové zvyškové napätie. [3]



- I - oblasť tlakových napätí vyvolaných trením chrčba rezného klína o obrábanú plochu;
- II - oblasť ťahových napätí vznikajúca plastickým stlačením materiálu;
- III - neovplyvnená oblasť, vyrovnanie napätí z oblastí I a II

Obr.3 Schéma vzniku zvyškových napätí v povrchovej vrstve spôsobených plastickými deformáciami vplyvom nástroja [3]

Do mechanizmov tvorby zvyškových napätí v obrobených povrchoch vstupujú všetky faktory, ktoré sa podieľajú na plastických deformáciách a určujú teplotné pomery v zóne rezania. Oblasti vplyvu týchto faktorov nie sú zatiaľ dostatočne preskúmané a výsledky prác jednotlivých autorov sa dosť líšia. Tieto skutočnosti vyžadujú ďalšie výskumy na vyslovenie všeobecne platných záverov. [3]



Porovnanie vzniku zvyškových napätí

Zvyškové napätia vzniknuté nerovnomernou plastickou deformáciou

- charakteristické pre technologické procesy s plastickým pretváraním povrchovej vrstvy;
- nedochádza k zásadnému tepelnému ovplyvneniu;
- po skončení procesu sa pružne deformované vrstvy snažia vrátiť do pôvodného stavu;

Zvyškové napätia spôsobené nerovnomerným teplotným ovplyvnením

- vznikajú pri nerovnomernom ohreve, alebo ochladení,
- príčina v rozdielnom module pružnosti materiálu v pôvodnom, resp. ohriatom stave;

Zvyškové napätia vzniknuté fázovou transformáciou

- charakteristické pre trieskové operácie,
- spôsobené nedokonalou ostrosťou nástroja a s tým spojeným rastom merného rezného objemu pri poklese hustoty obrábaného materiálu.

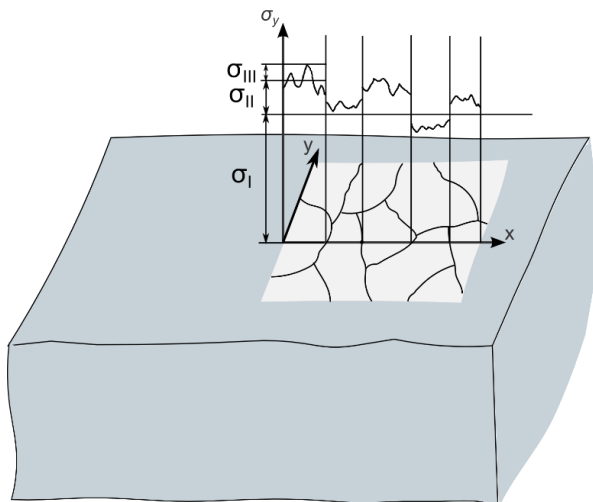
Na vznik zvyškových napätí majú vplyv fyzikálno-mechanické vlastnosti obrábaného materiálu. Pri obrábaní materiálov, kde $R_m/R_{p0,2} < 1,25$ sa tvorí trhaná (drobivá) trieska, pričom proces tvorenia jednotlivých elementov triesky narušuje spojenie medzi trieskou a obrábaným materiálom. Trecie sily na chrbte rezného klina sa snažia predĺžiť zrno v povrchovej vrstve a zväčšiť tak povrch. Tomuto bránia nižšie položené neovplyvnené vrstvy, čím v povrchovej vrstve vznikajú tlakové zvyškové napätia. Pri obrábaní húževnatých kovov a zliatin, keď $R_m/R_{p0,2} < 1,25$ vzniká strihaná (plynulá) trieska dochádza k deformácii zrn základného materiálu približne v smere odchodu triesky. Veľký význam v mechanizme tvorby zvyškových napätí má tiež hodnota zaťaženia pri plastických deformáciách. Pri obrábaní plastických materiálov, pri veľkých zaťaženiach rezného klina vzniká ťahové zvyškové napätie. Pri menších zaťaženiach tenších vrstiev vzniká tlakové zvyškové napätie. [3]

Podľa objemu, v ktorom vnútorné napätia dosahujú rovnováhy, sa rozdeľujú na:

- zvyškové napätie I. druhu – zasahujú celý objem súčiastky, alebo jeho podstatnú časť, t. j. majú makroskopický charakter. K týmto napätiam sa priraduje aj napätie v nekonečne tenkej, ale plošne rozsiahlej oblasti. Dôležité tu je, porušením

kompaktnosti súčiastky (napr. jej rozrezaním) dôjde k zmene makrogeometrie. Príčiny vzniku môžu byť dôsledkom obrábania, liatia, tvárnenia.

- zvyškové napätie II. druhu – zasahujú objem niekoľkých zŕn. Tieto napätia sú podmienené anizotrópiou zrna a sú (približne) homogénne len v malých oblastiach v polykryštalických kovoch v objemoch jednotlivých zŕn. Porušenie ich rovnováhy (rozrezaním vzorky) nemusí vyvolať zmeny makrogeometrie. Môžu vznikáť pri tepelných procesoch v materiáloch s fázami majúcimi rôzne hodnoty teplotných súčiniteľov dĺžkovej rozťažnosti,
- zvyškové napätie III. druhu – sa prejavuje v objeme niekoľkých atómových vzdialeností a je nehomogénne i v najmenších oblastiach materiálu. Tieto napätia dosahujú rovnováhy len v dostatočne veľkej časti zrna. Prerúšením tejto rovnováhy nedôjde nikdy k zmenám makroskopických objemov telesa. Sú dôsledkom štruktúrnych porúch – bodových, čiarových, plošných, a pod. [26]



Obr. 4 Druhy zvyškových napätí:

σ_I - zvyškové napätie I. druhu; σ_{II} - zvyškové napätie II. druhu; σ_{III} - zvyškové napätie III. druhu



Porovnanie druhov zvyškových napätí

Zvyškové napätia I. druhu

- zasahujú celý objem súčiastky, alebo podstatnú časť, tj. majú makroskopický charakter;

Zvyškové napätia II. druhu

- zasahujú objem niekoľkých zŕn;
- porušenie ich rovnováhy nemusí vyvolať zmeny makrogeometrie;

Zvyškové napätia III. druhu

- prejavujú sa v objeme niekoľkých atómových vzdialeností, nepresahujú objem zrna materiálu.

2.1.1 Metódy merania zvyškových napätí

V uplynulých rokoch bol vypracovaný celý rad metód na meranie zvyškových napätí, či už kvantitatívnych, alebo kvalitatívnych. Klasifikovať ich možno podľa viacerých parametrov.

Podľa toho, do akej miery bude narušená celistvosť vyšetrovaného materiálu, existujú metódy: - **deštruktívne** - dôjde k úplnému znehodnoteniu telesa;

- **polodeštruktívne** - dôjde k čiastočnému znehodnoteniu skúmanej súčiastky, pričom toto znehodnotenie nemá zásadný vplyv na jeho funkčnosť a spoľahlivosť, resp. je toto znehodnotenie možné odstrániť.

- **nedeštruktívne**.

Podľa zvoleného princípu, alebo sprievodného javu:

mechanické metódy: patrí sem väčšina deštruktívnych metód ako napr.:

- odvítavacia metóda;
- metóda uvoľnenia stípkika;
- metóda odstraňovania povrchovej vrstvy materiálu;
- deliace metódy.

fyzikálne metódy: založené na rôznych fyzikálnych javoch a veličinách ovplyvnených vznikom a charakterom zvyškových napätí:

- difrakčné metódy (röntgenová, neutrónová, elektrónová),
- ultrazvukové metódy,
- magnetické metódy (magnetorestričková metóda, sledovanie tzv. Barkhause-novho šumu),
- metóda merania mikrotvrdosti.

nepriame metódy:

- metóda krehkých náterov,
- fotoelasticimetria,
- metóda vŕtania. [26]

Ako spomína Ganev, je potrebné poznamenať, že ani jeden zo známych spôsobov merania zvyškových napätí nie je univerzálny, pretože jednotlivé metódy je možné spravidla úspešne aplikovať vždy len na určité druhy materiálov (kryštalické, priehľadné, feromagnetické a pod.). Dôležitým faktom ostáva, že zvyškové napätia je možné merať len pomocou sprievodných javov, ktoré zvyškové napätia ovplyvnili (deformácie, vodivosť atď.). Dá sa však konštatovať, že výsledky jednotlivých relatívnych meraní sú dostatočne spoľahlivé nezávisle na použitej metóde, hoci hodnoty napätí určených rôznymi metódami môžu mať až rádové rozdiely. [11]



Metódy merania zvyškových napätí podľa porušenia materiálu

- deštruktívne;
- polodeštruktívne;
- nedeštruktívne.

podľa princípu

- mechanické;
- fyzikálne;
- nepriame.



Potrebné si zapamätať

Neexistuje univerzálna metóda merania zvyškových napätí, avšak tu spomínané metódy sú dostatočne spoľahlivé.

2.1.1.1 Mechanické metódy

Odvrtavacia metóda

Patrí medzi najčastejšie používané metódy. Medzi najjednoduchšie zariadenia patrí odvrtavacia súprava, ktorá umožňuje centrovanie odvrtávaného otvoru nad tenzometrickú ružicu. Odvrtaním otvoru v strede tenzometrickej ružice aplikovanej na meranom objekte sa uvoľnia zvyškové napätia, ktoré sa v ňom vyskytujú. Tie vyvolajú v okolí otvoru deformácie, ktoré sa môžu merať na povrchu meraného objektu tenzometrami. Tenzometrická ružica pre metódu odvrtavania sa aplikuje na požadované meracie miesto. [49]



Obr. 5 Příklad odvrtavacej súpravy SINT-MTS 3000 s vyhodnocovacím softvérom

Zariadenie (Obr. 5) obsahuje vodiaci stojan na presné nasmerovanie a vŕtanie otvoru v strede tenzometrickej ružice. Zariadenie je s meraným prvkom spojené prilepenými podložkami, ktoré tvoria lôžka pre tri vyrovnávacie skrutky, ktoré umožňujú aplikáciu na nerovné alebo zaoblené povrchy. Nastavenie vodiaceho zariadenia vzhľadom k ružici sa zabezpečuje

špeciálnym mikroskopom zasunutým do vodiaceho otvoru a následným nastavením nitkového kríža presne nad tenzometrickú ružicu. Mikroskop sa tiež používa na meranie priemeru otvoru po jeho vyvrtaní. Po nastavení zariadenia a jeho fixácií sa namiesto mikroskopu vloží do vodiaceho otvoru vŕtacie zariadenie s frézou, ktorá slúži na odvrtanie otvoru. Vŕtacie zariadenie je vybavené univerzálnym nadstavcom pre kĺbové spojenie s vŕtačkou. Tento spôsob vŕtania sa používa pri určovaní zvyškových napätí pre mäkké ocele alebo hliníkové zliatiny. Materiál, ktorý sa opracováva veľmi ťažko, môže byť vŕtaný kombináciou vysokorýchlostnej vzduchovej turbíny a karbidového rezacieho nástroja. [6]

Vlastné meranie má tieto kroky:

- špeciálna meracia ružica s tromi tenzometrickými snímačmi sa umiestni na meraný objekt na miesto, kde sa majú určiť zvyškové napätia. Tenzometrická ružica sa používa preto, lebo vo všeobecnosti ide o rovinnú napätosť.
- tenzometrické snímače sú spojené s meracou jednotkou na statické meranie deformácií.
- zariadenie sa umiestni nad tenzometrickú ružicu a bezpečne pripevní na meranú súčiastku.
- os odvrtania sa pomocou mikroskopu opticky stotožní so stredom tenzometrickej ružice
- po vynulovaní údajov zo snímačov sa odvŕta otvor cez stred ružice do potrebnej hĺbky skúmaného materiálu.
- pomocou vhodnej aparatury sa zaznamenávajú namerané hodnoty.
- namerané hodnoty sa ďalej spracúvajú ručne, alebo pomocou programu. [6]



Pozor na odlišnosť

Pri metóde vŕtania dochádza taktiež k navŕtaniu diery do materiálu, avšak táto diera je niekoľkonásobne hlbšia ako sú jej priemery. Navyše ide o čisto deštruktívnu metódu.

2.1.1.2 Fyzikálne metódy

Takmer všetky fyzikálne metódy možno zaradiť taktiež medzi nedeštruktívne metódy merania zvyškových napätí, ktoré využívajú predovšetkým vzťah a závislosť špecifických vlastností materiálu na fyzikálnych, alebo kryštalografických parametrov.

Ultrazvukové metódy

Ultrazvukové metódy využívajú viacero princípov v súvislosti so šírením ultrazvuku v materiáli. Je to predovšetkým rýchlosť šírenia ultrazvuku v materiáli, ultrazvuková absorpcia a odraz ultrazvuku od náprotivnej steny (tzv. odrazová impulzná metóda). Súčasťou ultrazvukových metód je aj využitie akustickej emisie. Sú vhodné predovšetkým na zisťovanie

chýb materiálov, ale je možné ju využiť aj na meranie napríklad tvrdosti a napätového stavu. [26]

Zmeny v ultrazvukovej rýchlosti je možné pozorovať, ak je materiál vystavený stresu, zmeny zabezpečujú mieru napätia v priemere pozdĺž vlnovej cesty. Akusto - elastické koeficienty potrebné pre analýzu sa obvykle počítajú s použitím kalibračných testov. Rôzne typy vln môžu byť použité, ale bežne používaná technika je kriticky lomená metódou pozdĺžne uhlových vln. Najväčšia citlivosť je získaná pri vlnách v rovnakom smere ako napätie. [51]

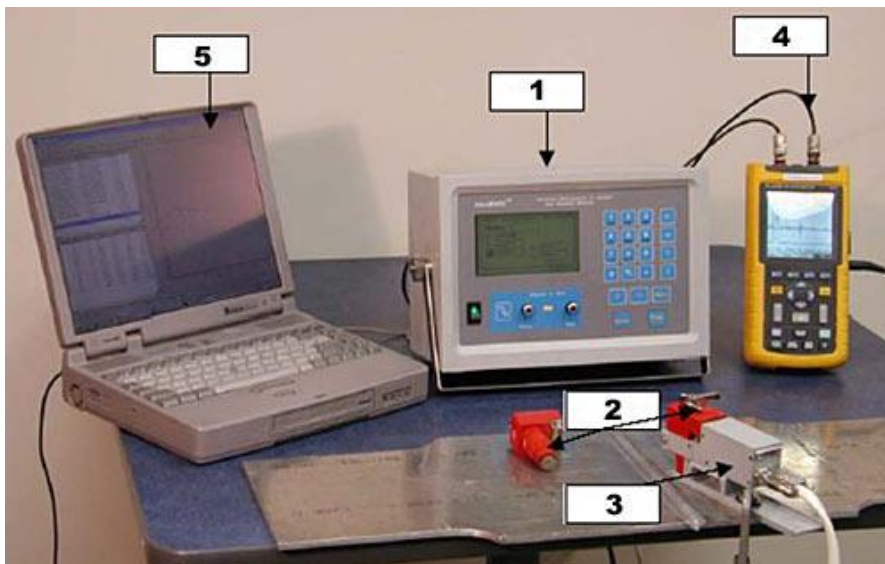
Základná rovnica pre výpočet napätia meraného pomocou ultrazvukovej metódy:

$$V = V_0 + K \cdot \sigma \quad (1)$$

kde V_0 – rýchlosť vlny v nenapätovom médiu,

σ - napätie v materiáli

K - akusto - elastická konštanta.



Obr. 6. Príklad zariadenia na meranie zvyškových napätí ultrazvukovou metódou: 1 - hlavná meracia jednotka s mikroprocesorom; 2 - ultrazvukový dotykový vysielateľ; 3 - držiak vysielateľa; 4 - prenosný osciloskop na vizualizáciu ultrazvukových signálov; 5 - prenosný počítač na spracovanie výsledkov [16]

Magnetické metódy

Magnetické metódy sú založené na analýze súvislostí medzi napätosťou a magnetickými vlastnosťami alebo prejavy zaznamenávanými pri magnetizácii. Už z tohto vymedzenia vyplýva, že to sú metódy nedeštruktívneho charakteru, uplatniteľné iba pri vyšetrení zvyškových napätí vo feromagnetických materiáloch. Naproti tomu, výhodou tejto metódy je vysoká schopnosť automatizácie a rýchlosť vyhodnotenia požadovaných charakteristík. [49]

Je možné sa stretnúť najmä s využívaním:

- Barkhausenovho javu,
- magnetostríckie - presnejšie povedané inverzného magnetostríckého javu. [49]



Obr. 7 Schéma merania zvyškových napätí s využitím Barkhausenovho javu [21]

Príčinou magnetizácie látky je pôsobenie tzv. výmenných síl medzi susednými atómami. Vplyvom týchto síl nastáva aj bez vonkajšieho pôsobenia súhlasné usporiadanie magnetických polí atómov v malej oblasti látky. Pri tejto spontánnej samovoľnej magnetizácii vznikajú v látke zmagnetizované mikroskopické oblasti, tzv. Weissovej domény (magnetické domény). Jednotlivé domény sú však orientované náhodne, takže celkový magnetický moment je nulový. Ak pôsobí teraz na teleso silnejšie magnetické pole, dochádza v menších alebo väčších objemoch Weissových oblastí k náhlym zmenám smeru magnetického momentu presne do smeru poľa. Tento proces sa prejavuje Barkhausenovým efektom: v silnom magnetickom poli pribúda magnetizácia po malých skokoch, nie teda spojitou. V dôsledku toho sa v cievke obklopujúcej magnetizovaný kov indukujú prúdové nárazy. Možno je pozorovať - po zosilnení - akusticky ako tzv. Barkhausenov šum. [49]

Barkhausenov šum má pre väčšinu materiálov frekvenčné spektrum začínajúce na magnetizačnej frekvencii a končiacie približne na 250kHz. Signál je tlmený v závislosti na vzdialenosti, ktorú prejde v vnútri materiálu. Pri bežných aplikáciách sa meraná hĺbka pohybuje medzi 0,01 až 1,5mm. [21]

Na intenzitu signálu majú zásadný vplyv materiálové charakteristiky. Jedným z nich je prítomnosť a rozloženie zvyškových napätí, ktoré ovplyvňujú cestu, po ktorej sa domény pohybujú v smere k ľahšej orientácii podľa magnetizácie materiálu. Tento jav sa nazýva magnetoelastická interakcia, kedy v materiáloch s pozitívnou magnetrostriekciou (železo, väčšina ocelí, kobalt apod.) tlakové napätie znižuje intenzitu Barkhausenovho šumu, zatiaľ čo ťahové napätie ju zvyšuje. Práve táto skutočnosť umožňuje použiť daný jav na meranie zvyškových napätí. Z merania je tiež možné určiť základný smer napätí. [21]

Röntgenová difraktometria

Röntgenová difraktometria je jedným z nástrojov na skúmanie mikroštruktúry v materiáli. Jej počiatky siahajú do roku 1912 kedy Laue zistil, že kryštály dokážu difraktovať röntgenové žiarenie. [6]

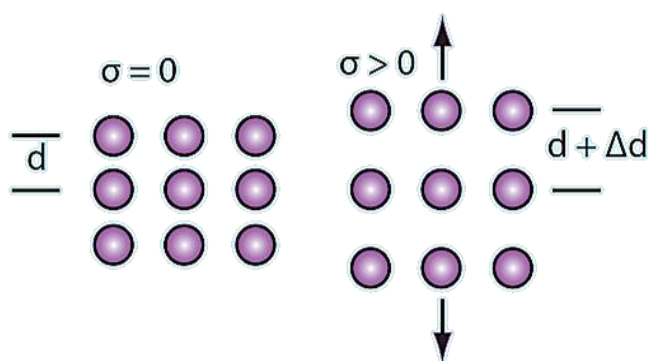


Literatúra

Viac o mikroštruktúre materiálov a ich vplyve na difrakciu röntgenových lúčov možno nájsť v knihe od B.D. Cullita Elements of X-ray Diffraction.

Zvyškové napätia sú neoddeliteľnou súčasťou vnútornej štruktúry materiálu. Možno ich definovať ako napätia, ktoré ostanú v materiáli aj po odstránení všetkých síl, ktoré na obrábaný materiál vplývali počas procesu obrábania. [10]

Podstatou využitia röntgenovej difraktometrie na meranie zvyškových napätí je fakt, ako vplývajú na štruktúru polykryštalického materiálu a vzdialenosti kryštalografických rovín. Pokiaľ je napätie nulové, vzdialenosti kryštalografických rovín závisia len od vlastností materiálu. Vplyvom zvyškových napätí, sa tieto vzdialenosti môžu meniť, tak ako je to znázornené na obr. 8. [36].



Obr. 8 Schematický náčrt závislosti vzdialenosti kryštalografických rovín od zvyškových napätí. [36]

Podstatou röntgenografickej metódy je meranie mriežkovej konštanty kryštálov v závislosti od pružnej deformácie pri využití difrakcie žiarenia. Jedná sa o nedeštruktívnu metódu. Zaznamená iba deformáciu, ktorá je úmerná veľkosti zvyškového napätia. Nevýhodou je jej obmedzená použiteľnosť na kryštalické resp. polykryštalické materiály. [36]

Samotná difrakcia röntgenového lúča vychádza z Braggovho zákona:

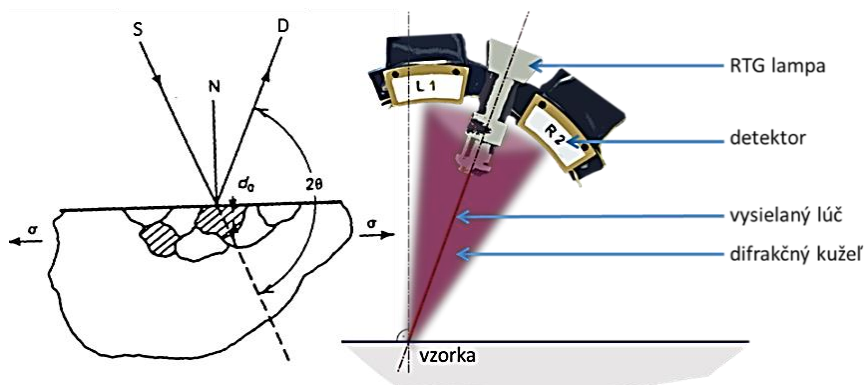
$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta \quad (2)$$

kde:

λ - vlnová dĺžka (n - číslo udávajúce rád);

d - vzdialenosť rovín kryštalografickej mriežky;

θ - uhol difrakcie;

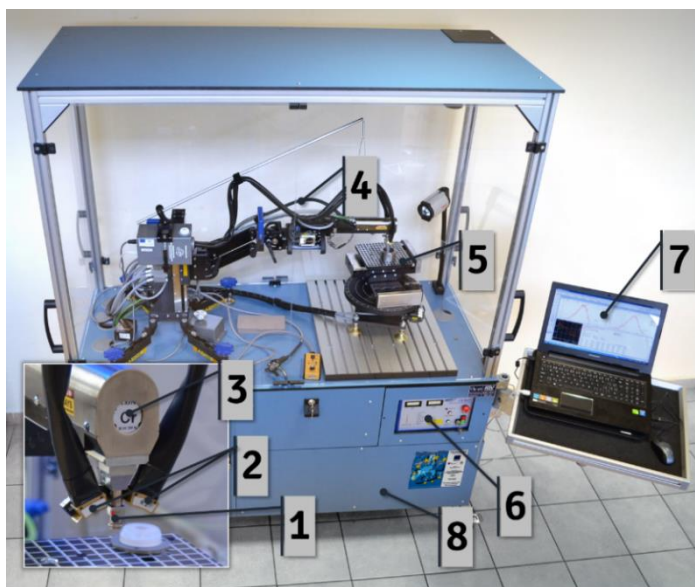


Obr. 9 Difrakčný uhol a princíp zaznamenania difrakčného kužeľa na detektoroch meracieho prístroja [36]



Porovnanie metódy

Princíp difrakcie využíva aj metóda merania zvyškových napätí neutrónovou difraktometriou, ako už však zo samotného názvu vyplýva namiesto röntgenového lúča je tu použitý zväzok monochromatického žiarenia tepelných neutrónov, ktoré sú generované v jadrovom reaktore. V porovnaní s röntgenovou difraktometriou je možné merať zvyškové napätia v rádovo väčších hĺbkach materiálu.

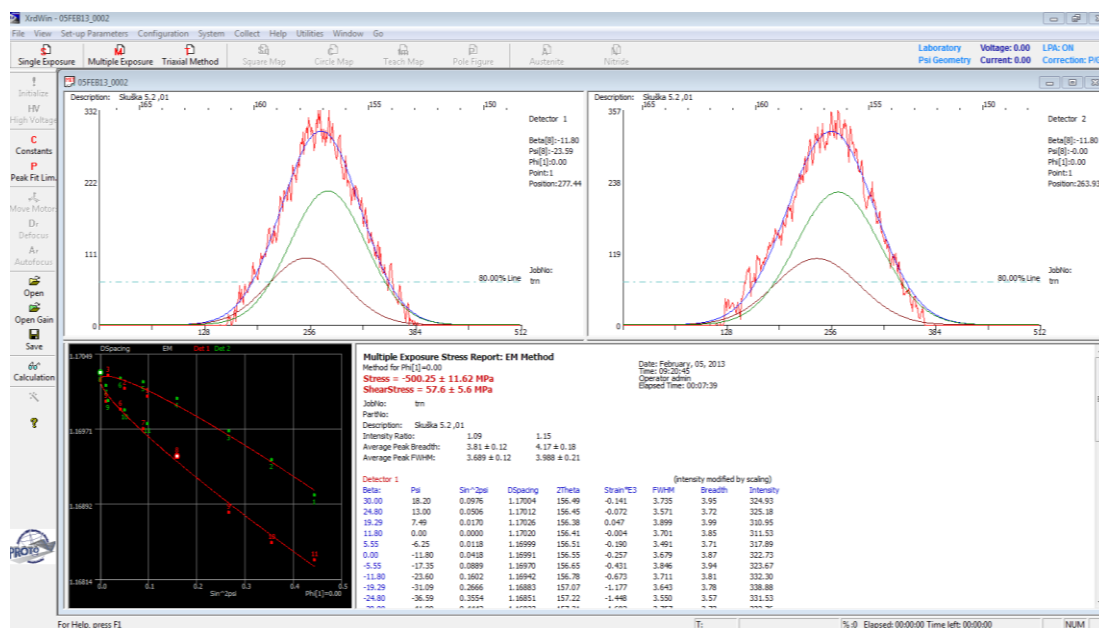


Obr. 10. Zariadenie na mranie zvyškových napätí Proto iXRD (laboratórna zostava):
 1 - kolimátor usmerňujúci röntgenový lúč; 2 - dvojica detektorov zachytávajúca difrakčný kužeľ;
 3 - X-ray trubica s Cr terčíkom; 4 - Cobralink ® flexibilná meracie rameno; 5 - polohovateľný a otočný stôl;
 6 - riadiaca jednotka; 7 - počítač s ovládacím softvérom; 8 - iXRD laboratórna skriňa

Akákoľvek zmena v mriežkovej vzdialenosti d vyústi do príslušného difrakčného uhla (Obr. 9). Vyslaný röntgenový lúč vniká do povrchových vrstiev materiálu, kde v závislosti od vzdialenosti kryštalografických rovín difraktuje do difrakčného kužeľa, ktorý je zaznamenaný na ploche detektorov.

Z dostupných nedeštruktivných metód merania zvyškových napätí predstavuje metóda röntgenovej difraktometrie jednu z najvýhodnejších pre oblasť obrábania. Hlavným obmedzením danej metódy je aplikovateľnosť len na kryštalické materiály (resp. materiály s kryštalickou mriežkou), avšak toto obmedzenie v súčasnej dobe pokrýva väčšinu používaných materiálov v strojárskvej výrobe. Výhodou metódy je vyhodnotenie zvyškových napätí v absolútnych fyzikálnych jednotkách (MPa), časovo pomerne nenáročným spôsobom.

Postup merania zvyškových napätí pomocou röntgenovej difrakcie je možné vysvetliť na zariadení Proto iXRD. Prístroj umožňuje merať zvyškové napätia vo všetkých kryštalických materiáloch a vďaka svojej konštrukcii je rovnako použiteľný v laboratórnych podmienkach, ako aj v reálnom výrobnom procese. Vďaka variabilnosti detekčnej hlavy a rôzne tvarovaným kolimátorom umožňuje merať zvyškové napätia na miniatúrnych súčiastkach (napr. dentálne implantáty apod.) až po veľkorozmerné súčiastky (napr. plynovodné, alebo ropovodné potrubie atď.). Súčasťou prístroja je polohovateľný stôl s posuvom v dvoch osiach (X, Y) a otáčaním v tretej osi (os Φ).



Obr. 11. Grafické rozhranie aplikácie XrdWin – ovládacieho softvéru meracieho systému Proto iXRD

Postup merania zvyškových napätí pomocou prístroja Proto iXRD pozostáva z uvedených krokov:

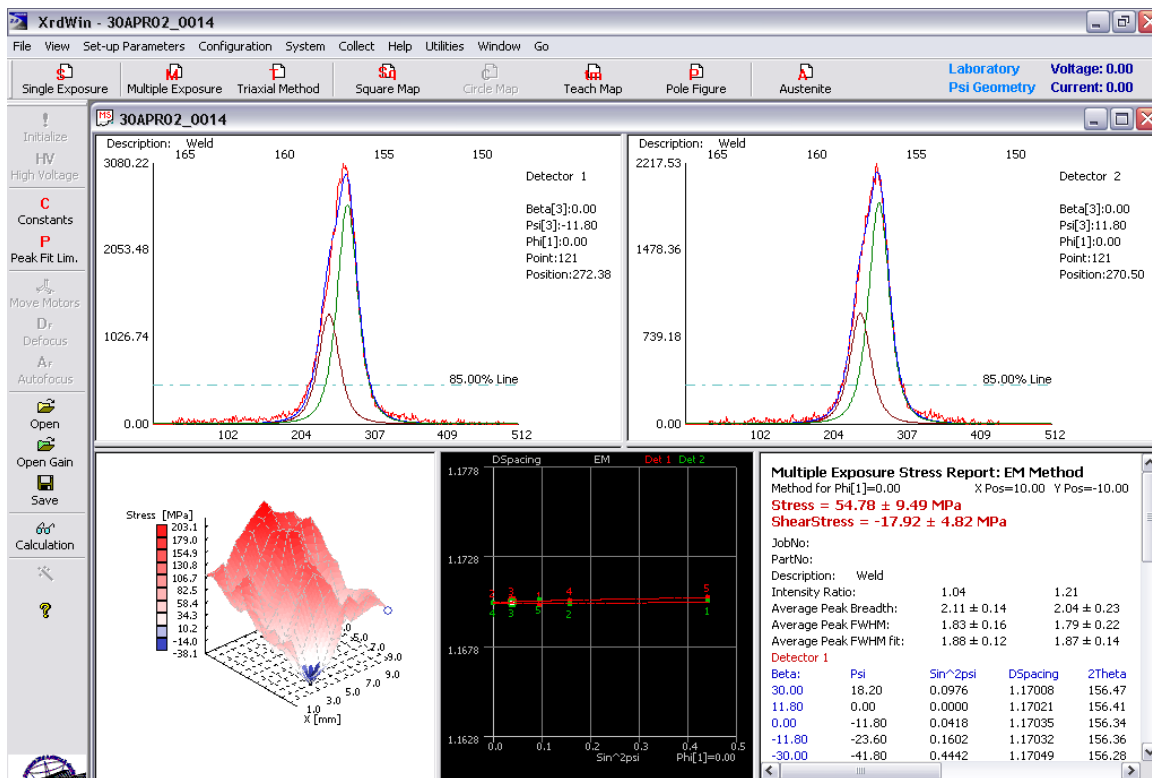
- umiestniť vzorku pod meraciu hlavu, tak aby kolimátor smeroval kolmo na povrch meranej vzorky;
- nastaviť správnu výšku meracej hlavy tzv. fokusáciou - röntgenový lúč je, tak sústredený do povrchových vrstiev, kde preniká do hĺbky približne 12 μm a následne v závislosti od charakteru zvyškových napätí diffraktuje v podobe difrakčného

kužela, ktorý je zachytený dektormi (Obr. 9). Röntgenový lúč je postupne vysielaný vo viacerých nakloneniach meracej hlavy v pravidelných rozstupoch od +30° do -30°

- ovládací a analytický softvér XrdWin (Obr. 11) následne zaznamená signály zachytené na detektory a spracúva ich v podobe kriviek Gaussovho rozdelenia. Šírka kriviek (tzv.peakov) udáva zrnitosť materiálu. Čím je zrno materiálu jemnejšie, tým je krivka širšia – v jednotlivých zrnách sa röntgenový lúč odráža s rôznou intenzitou, a naopak, čím je krivka užšia, tým je zrno materiálu väčšie. Tento jav je vo výstupe zaznamenaný aj pod pojmom FWHM (full width at half maximum – celková výška v polovici maxima), čo je jedným zo základných hodnotení Gaussovho rozdelenia.

Celkové namerané zvyškové napätie je integrálna hodnota zaznamenaná z viacerých náklonov meracej lampy a vo výstupe sa nachádza pod názvom Stress. Názov ShearStress označuje šmykové, alebo tiež tangenciálne napätie. Obidve napätia sú vyhodnotené v mega pascaloch.

Merací systém s pomocou automatizovaného polohovacieho stroja umožňuje okrem bodového merania zvyškových napätí vykonávať aj 2D, resp. 3D mapovanie povrchových vrstiev materiálu, tak ako je to na Obr. 22.



Obr. 22. Možnosti meracieho systému Proto iXRD – mapovanie zvyškových napätí

2.1.1.3 Nepriame metódy

Metóda krehkých náterov

Metódou krehkých náterov (alebo inak lakov) je možné zistiť rozloženie, hlavné smery a miesta maximálnych napätí v študovanej oblasti. Princíp metódy spočíva v tom, že na povrch vzorky sa nanese živcový povlak, ktorý je svojou krehkosťou schopný sledovať deformácie povrchu len po istú hranicu. Po jej prekročení dochádza k popraskaniu náteru kolmo na smer maximálneho predĺženia. Výhodou metódy je získanie rýchlej informácie o stave napätosti v sledovanej oblasti. Presnosť tejto metódy je však malá a výsledky ovplyvňuje teplota a vlhkosť. [26]

Fotoelasticimetria

Princíp tejto metódy je založený na vlastnostiach polarizovaného svetla a na schopnosti niektorých priehľadných látok (sklo, plexisklo a pod.), ktoré sú za normálneho stavu izotropné a vplyvom napätia získavajú dočasne vlastnosti kryštalických látok. Pri tom optické osi týchto „kryštálov“ sa v každom bode skúmaného modelu zhodujú so smermi hlavných napätí.

Vyhodnotenie oboch sústav sa robí na fotografiách. Vyhodnocovanie výsledkov je prácne a časovo náročné. [26]

Metóda vrtania

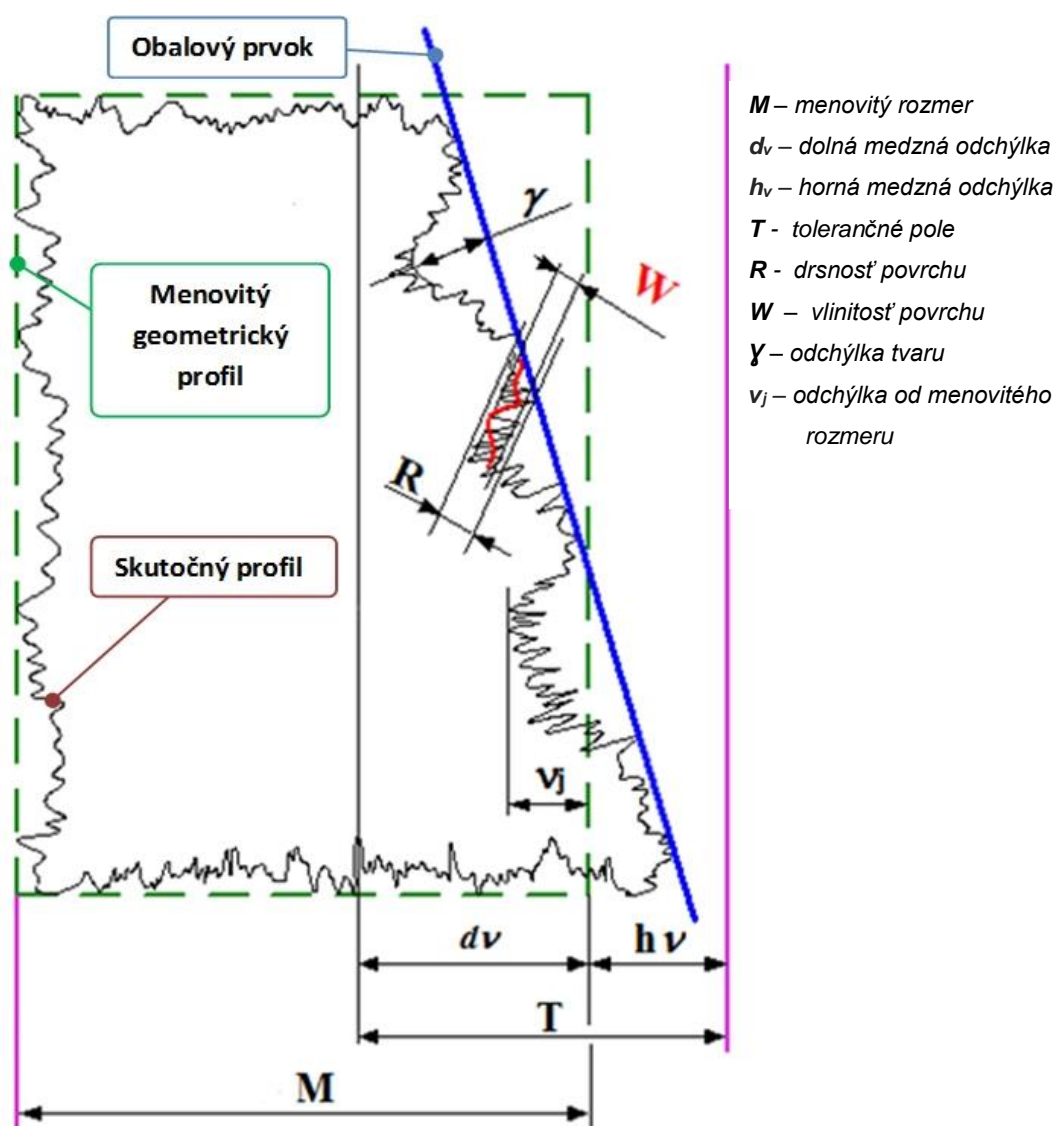
Je založená na vrtaní otvoru mechanicky zaťaženého telesa, prípadne telesa, ktoré obsahuje zvyškové napätia. Ide teda o deštruktívnu skúšku. Odvrtaním časti telesa, ktoré obsahuje napätia, sa tieto napätia uvoľnia, čo vedie k deformácii. Deformácia umožňuje určiť smer a približne aj veľkosť napätí. Využíva elektrické odporové tenzometre. [26]

2.1.2 Analýza integrity povrchu

Na integritu povrchu, ako už bolo spomenuté vyššie vplýva viacero faktorov. Analýza vizuálne kontrolovateľných ukazovateľov je v poslednej dobe nahradzovaná skúmaním povrchových a podpovrchových vrstiev materiálu. Z dostupných meracích metód sa tento výskum zameriava predovšetkým na skúmanie zvyškových napätí so snahou vytvoriť, čo najpresnejší model korelácie medzi zvyškovými napätiami a funkčnými, resp. mechanickými vlastnosťami súčiastok. Výber vhodnej metódy je tiež ovplyvnený radom faktorov, ktoré je potrebné zohľadniť, či už z hľadiska skúmaného materiálu (tvar, štruktúra apod), charakteru metódy (možnosť automatizácie, aplikovateľnosť vzhľadom na skúmaný tvar súčiastky, časovú náročnosť merania a pod.).

2.2 Geometrické parametre súčastok

Povrch každého obrobku sa skladá z rôznych geometrických prvkov (obr.13), aj keď sa na prvý pohľad javí, ako hladký a lesklý. Počas výrobného procesu pôsobí veľké množstvo vplyvov (napr. zvolená technológia výroby, proces výroby, ľudské faktory a iné.), ktoré bránia vytvoreniu súčastky ideálneho tvaru. Takto zhotovené výrobky vykazujú určité povolené odchýlky od vyžadovaného geometrického tvaru. Kontrola takýchto odchýlok z hľadiska funkčnosti a vzájomnej vymeniteľnosti je veľmi podstatná a realizuje sa v súlade s predpísanými normami GPS (Geometrické špecifikácie a verifikácie výrobkov). Ak tieto normy nie sú rešpektované, výsledky kontroly majú iba informatívny charakter!



Obr.13 Geometrické prvky (odchýlky) na povrchu obrobku [18]



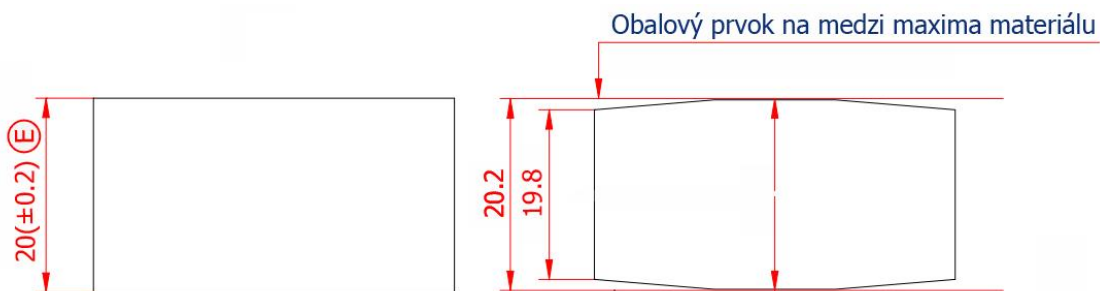
Potrebné si zapamätať

Geometria povrchu súčiastky je tvorená profilom drsnosti, vlnitosti a tvaru.

Vzájomné vzťahy medzi toleranciami rozmeru a geometrickými toleranciami sú upravené príslušnou normou. Z hľadiska predpisovania tolerancií rozlišujeme tolerovanie:

A. závislé – vzájomná závislosť rozmerových a geometrických tolerancií. Na výrobných výkresoch sa vyjadruje podmienkami:

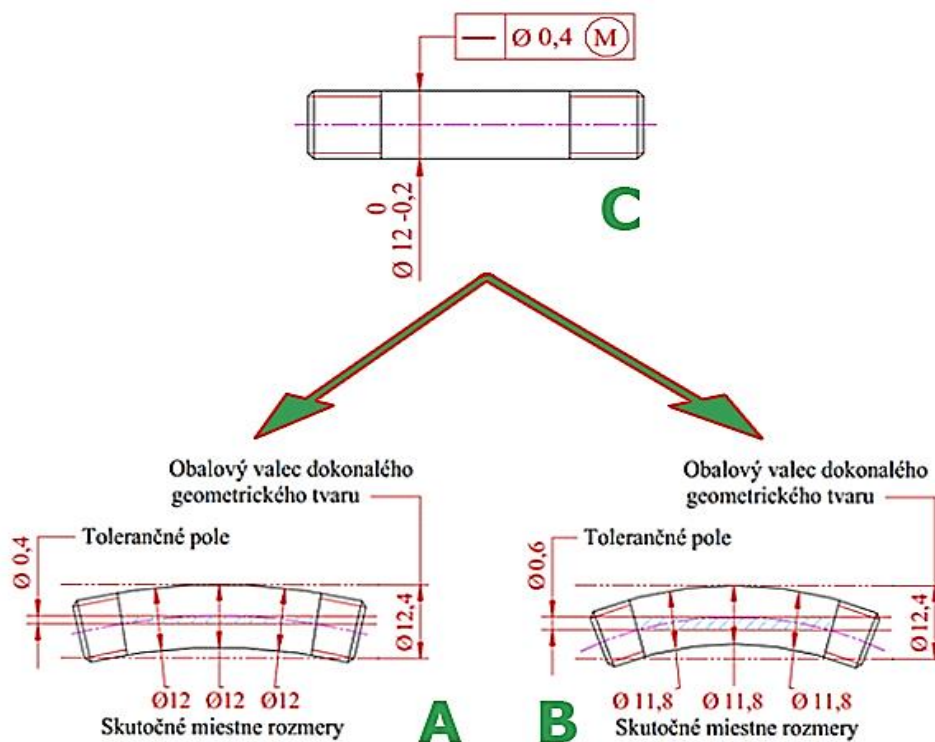
- **podmienka obalovej plochy (E)** - znamená, že obálka príslušného menovitého tvaru s rozmerom na maxime materiálu nesmie byť prekročená. Predpisuje sa na výkrese príslušnou značkou (E v krúžku obr. 14) alebo odkazom na príslušnú normu.



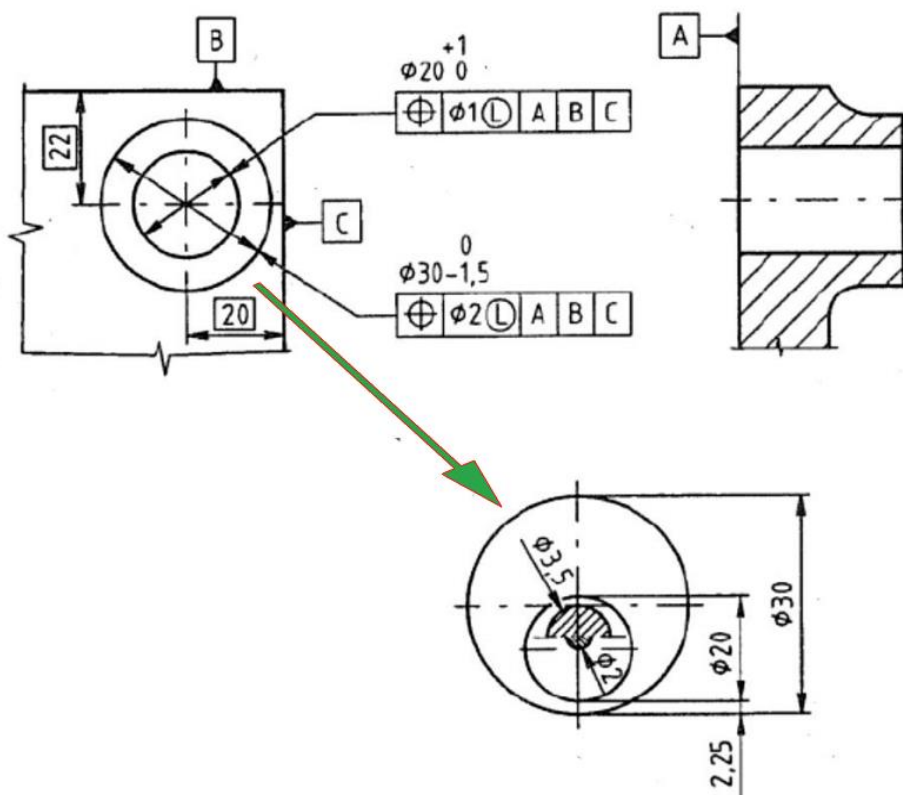
Obr.14 Podmienka obalovej plochy predpísaná na výkrese

- **podmienka maxima materiálu M** – je stav posudzovaného prvku, pri ktorom je jeho skutočný rozmer všade na tomto hraničnom rozmere, ktorý odpovedá maximu materiálu napr. dolný medzný rozmer – diera, horný medzný rozmer - hriadeľ [48]. Predpisuje sa na výkrese značkou M v krúžku (obr. 15c).

Vyššie uvedená podmienka dovoľuje za určitých podmienok (ak skutočný rozmer sledovaného prvku nedosahuje hodnotu maxima materiálu) zväčšiť geometrickú toleranciu (o rozdiel medzi skutočným rozmerom a hranicou maxima materiálu) na úkor rozmerovej tolerancie. Ak je predpísaná tak, ako je uvedené na obr.15c - znamená, že os hriadeľa musí ležať vo vnútri tolerancie priamosti o veľkosti tolerančnej zóny $\varnothing 0,4$ mm, pričom všetky jeho vonkajšie priemery sú na rozmere maxima materiálu $\varnothing 12$ mm (obr. 15a) a môže sa meniť vo vnútri tolerančnej zóny do $\varnothing 0,6$ mm, ak sú všetky vonkajšie rozmery na minime materiálu $\varnothing 11,8$ mm (obr. 15B).



Obr.15 Podmienka maxima materiálu [48]

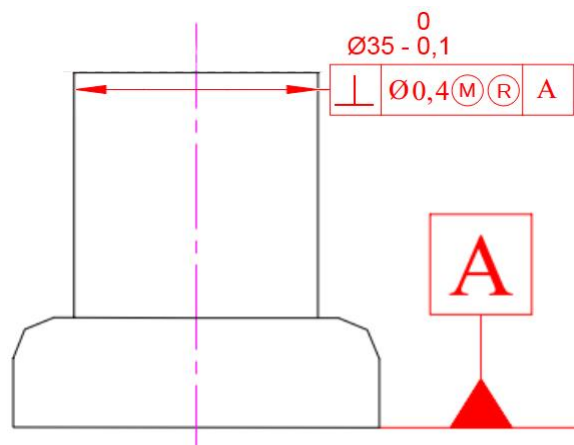


Obr.16 Podmienka minima materiálu [41]

- **podmienka minima materiálu L** – je stav posudzovaného prvku, pri ktorom je jeho skutočný rozmer všade na tomto minimálnom rozmere ktorý odpovedá minime materiálu napr. horný medzný rozmer diery, dolný medzný rozmer hriadeľa. [32] Predpisuje sa na výkrese značkou L v krúžku (obr. 16).

Vyššie uvedená podmienka dovoľuje za určitých podmienok (ak skutočný rozmer sledovaného prvku nedosahuje hodnotu minima materiálu) zväčšiť geometrickú toleranciu (o rozdiel medzi skutočným rozmerom a hranicou minima materiálu obr.16) na úkor rozmerovej tolerancie.

- **podmienka reciprocity R** – možno ju charakterizovať ako inverznú funkciu k podmienke maxima alebo minima materiálu. Dovoľuje za určitých podmienok zväčšiť rozmerovú toleranciu na úkor geometrickej tolerancie. Predpisuje sa na výkrese značkou R v krúžku (obr. 17).



Obr.17 Podmienka reciprocity

B. nezávislé - platí pravidlo nezávislosti. Ak sa použije, kontroluje sa samostatne správnosť dĺžkových alebo uhlových rozmerov a celkom nezávisle na týchto rozmeroch sa hodnotí správnosť dodržania geometrických tolerancií.

2.2.1 Základné pojmy

Odchýlka - je hodnota rozdielu medzi skutočným (nameraným) a obalovým prvkom (menovitým). Používa sa k opisu geometrie skutočného tvaru (napr. odchýlka rovnobežnosti) alebo vzťahov medzi prvkami (napr. odchýlka polohy).

Tolerancia - je lineárny rozmer, ktorý charakterizuje najväčšiu dovolenú hodnotu uvažovanej odchýlky. [18]

Tolerančná zóna - je plocha, ohraničená jednou alebo viacerými geometrickými presnými čiarami resp. povrchmi.

Tolerancia tvaru - najväčšia dovolená hodnota odchýlky tvaru.

Odchýlka polohy - je vzdialenosť, ktorá vyjadruje polohu posudzovanej čiary alebo plochy vzhľadom k jej menovitej polohe.

Obalová priamka - má tvar menovitej priamky, ktorá sa dotýka skutočného profilu tak, aby vzdialenosť medzi ňou a najvzdialenejším bodom profilu bola čo najmenšia.

Skutočná plocha - je plocha, ktorá ohraničuje súčiastku a zároveň ju oddeľuje od okolitého prostredia. [18]

Menovitá plocha - je ideálna plocha, ktorej menovitý tvar je určený výkresom resp. inou technickou dokumentáciou.

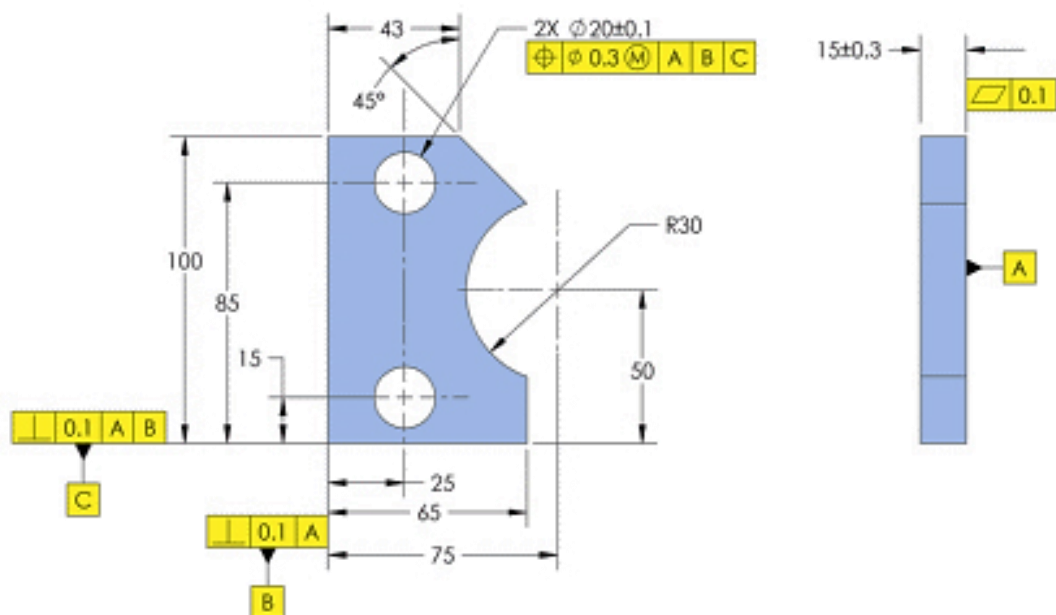
Zosnímaný profil - geometrické miesto stredu hrotu dotyku. [18]

Úplný profil - digitálna forma zosnímaného profilu. [18]

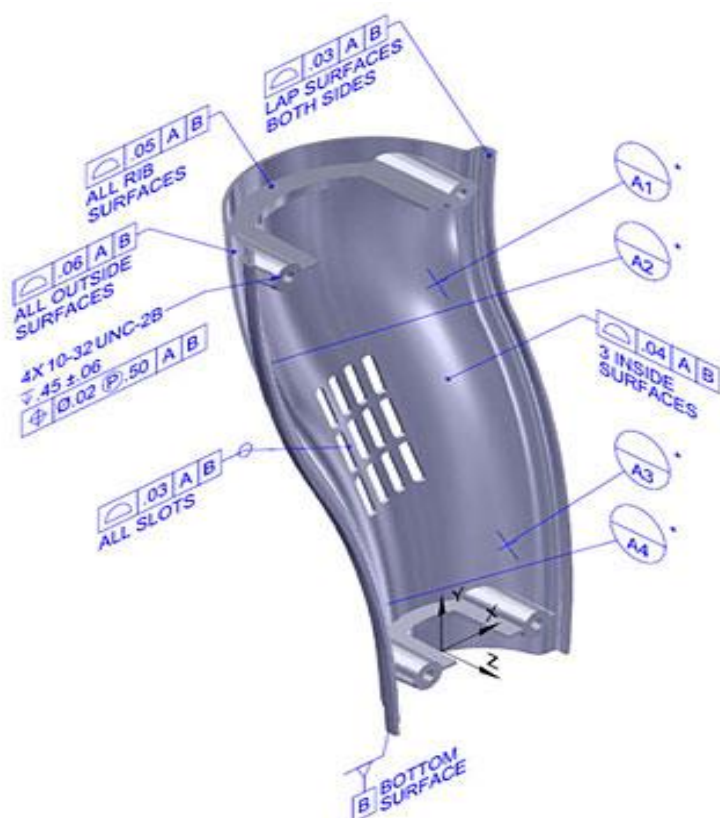
Geometrická základňa - je teoretický presný geometrický prvok (napr. os, priamka, rovina), ku ktorému sa vzťahuje príslušná geometrická tolerancia tolerovaného prvku. Nepoužíva sa u tolerancie tvaru. Ak používame viac základní, zapisujú sa v poradí od dôležitosti z hľadiska ich funkcie a v súlade s odoberaním stupňov voľnosti.

2.2.2 Geometrické tolerovanie

Jednotné definovanie a predpisovania geometrických tolerancií sa začalo rozvíjať v povoj-novom období minulého storočia, ako dôsledok rozširovania sa výroby. Každý výrobok je vyrábaný v súlade s určitou výrobnou dokumentáciou, kde musí vrátane dodržania vyžadovanej presnosti rozmerov dodržať aj presnosť geometrického tvaru a vzájomnej polohy. Vo všeobecnosti sa všetky druhy tolerancií geometrického tvaru, profilu, orientácie, polohy a hádzania označujú ako geometrické tolerancie (obr.18 a obr. 19). Hodnotia sa nezávisle, bez vzťahu k rozmerom výrobku.



Obr.18. Príklady označovania geometrických tolerancií v priestore v rovine (2D) [55]



Obr.19. Príklady označovania geometrických tolerancií v priestore(3D) [57]

2.2.2.1 Geometrické tolerancie tvaru

Ak berieme do úvahy iba jeden tvarový prvok, jeho odchýlka od ideálneho geometrického tvaru sa nazýva odchýlka tvaru [32]. Obecne sa definuje (meria) ako najväčšia vzdialenosť skutočnej plochy od obalovej plochy alebo od obalového profilu. Tolerančné pole prvku môže byť ohraničené:

- v rovine :
 - ✓ dvoma rovnobežnými priamkami,
 - ✓ medzikružím .

- v priestore :
 - ✓ dvoma rovnobežnými rovinami ,
 - ✓ dvoma sústrednými valcami .

Geometrické tolerancie tvaru nepriaznivo vplyvajú na funkčnosť jednotlivých výrobkov ako i celého stroja. Napríklad od priamosti a rovnobežnosti upínacích a vodiacich plôch závisí presnosť obrábacieho stroja. Odchýlky kruhovitosti a valcovitosti elementov valivého ložiska zvyšujú jeho hlučnosť a vzájomné opotrebenie jednotlivých častí. Medzi základné geometrické tolerancie tvaru zaraďujeme:

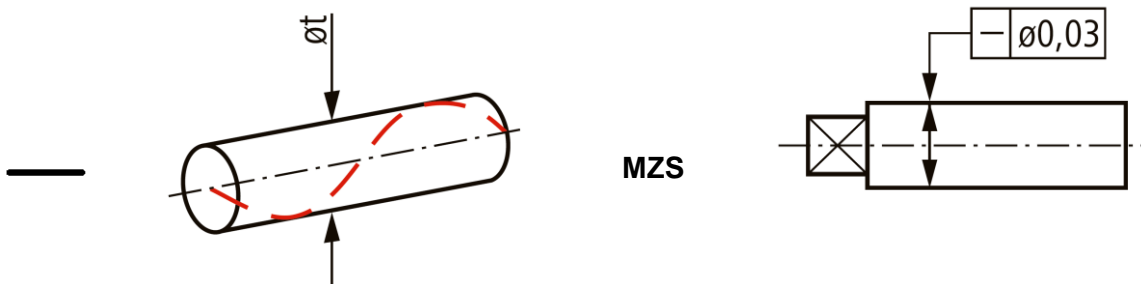
1. Priamosť

Priamosť tolerovaného prvku je považovaná za správnu, ak každý zosnímaný bod v rovine skutočného povrchu leží medzi rovnobežnými priamkami vzdialenými od seba o hodnotu predpísanou tolerančným polom. Na vyhodnotenie priamosti používame tieto metódy:

- **LSS (Least Squares Straight Line)** – referenčná (stredná) priamka profilu je preložená zosnímanými bodmi tak, aby súčet kvadrátov vzdialenosti jednotlivých bodov od nej bol minimálny. Od tejto priamky sa v kolmom smere hodnotí najväčšia vzdialenosť dvoch bodov profilu.

- **MZS (Minimum Zone Straight Lines)** – táto metóda sa tiež označuje ako obalová. Jedná sa o vytvorenie minimálnej nožnej zóny z dvoch rovnobežných priamok v ktorej budú obsiahnuté všetky zosnímané body. Hodnotí sa v kolmom smere najmenšia vzdialenosť dvoch priamok.

Označení	Tolerančná zóna	Metóda vyhodnotenia	Príklad
----------	-----------------	---------------------	---------

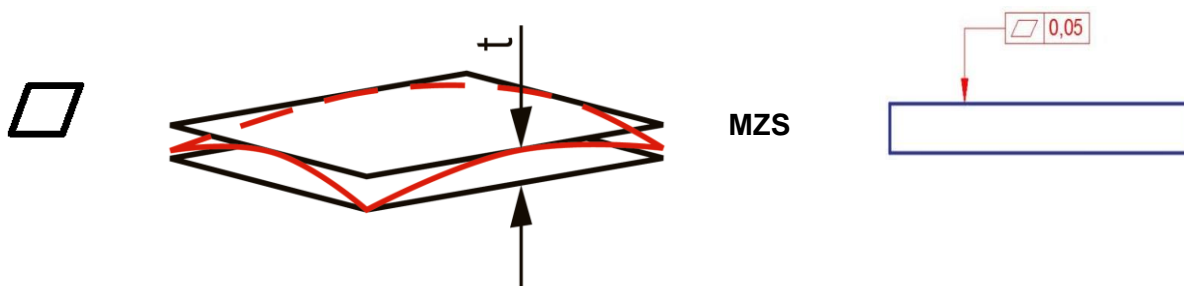


2. Rovinnosť

Rovinnosť tolerovaného prvku je považovaná za správnu, ak každý zosnímaný bod v priestore skutočného povrchu leží medzi rovnobežnými rovinami vzdialenými od seba o hodnotu predpísanou tolerančným polom. Na vyhodnotenie priamosti používame tieto metódy:


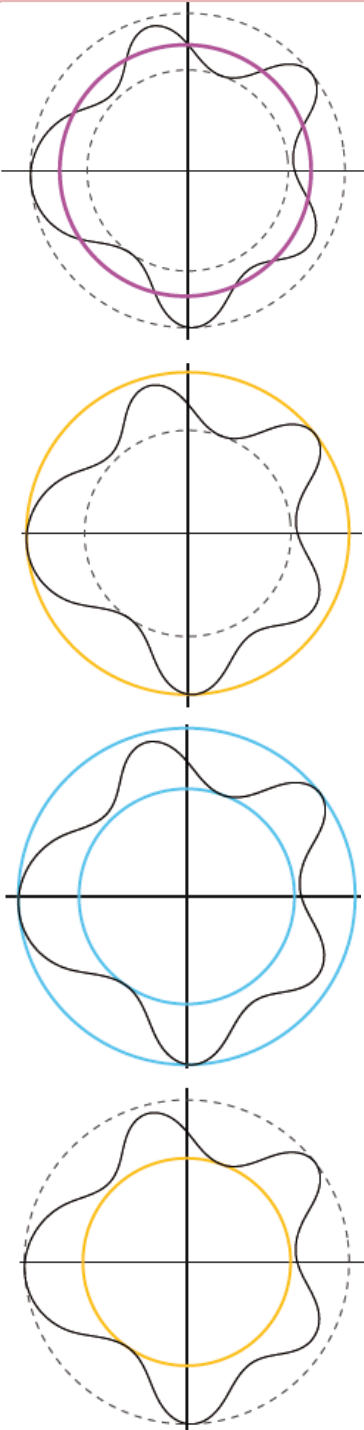
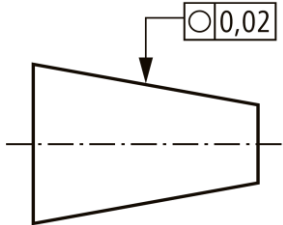
- **LSS (Least Square Straight Line)** – referenčná (stredná) rovina oblasti v priestore je preložená zosnímanými bodmi tak, aby súčet kvadrátov vzdialenosti jednotlivých bodov od nej bol minimálny. Od tejto roviny sa v kolmom smere hodnotí najväčšia vzdialenosť dvoch bodov oblasti.
- **MZS (Minimum Zone Straight Lines)** – táto metóda sa tiež označuje ako obalová. Jedná sa o vytvorenie minimálnej novej zóny z dvoch rovnobežných rovín, v ktorej budú obsiahnuté všetky zosnímané body. Hodnotí sa v kolmom smere najmenšia vzdialenosť dvoch rovín.

Označení	Tolerančná zóna	Metóda vyhodnotenia	Príklad
----------	-----------------	---------------------	---------



3. Kruhovitosť

Tolerančná zóna je ohraničená dvoma sústrednými kružnicami v rovine, ktorých radiálna vzdialenosť je úmerná predpísanej hodnote tolerancie. V závislosti od použitej metódy jedna kružnica plní funkciu obalového prvku a druhá referenčného prvku. Na vyhodnotenie používame tieto metódy:

Označenie	Tolerančná zóna	Metóda vyhodnotenia	Príklad
		<p>LSCI ←</p> <p>MCCI ←</p> <p>MZCI ←</p> <p>MICI ←</p>	

- **Maximálna vpísaná kružnica (MICI)** – referenčná kružnica je najväčšia možná kružnica vpísaná do zosnímaného profilu. Používa sa pre hodnotenie vnútorných povrchov.

- **Minimální opísaná kružnica (MCCI)** – referenčná kružnica je najmenšie možná kružnica opísaná okolo zosnímaného profilu. Používa sa pre hodnotenie vonkajších povrchov.
- **Minimálna radiálna vzdialenosť (MZCI)** – referenčná zóna je tvorená dvomi sústrednými kružnicami, ktoré zachytávajú zosnímaný profil v čo najmenšom rozdiel svojich polomerov.
- **Gaussová kompenzačná kružnica (LSCI)** – referenčná kružnica je preložená cez zosnímaný profil metódou najmenších štvorcov. Táto metóda je nepatrne ovplyvnená vybočením profilu.



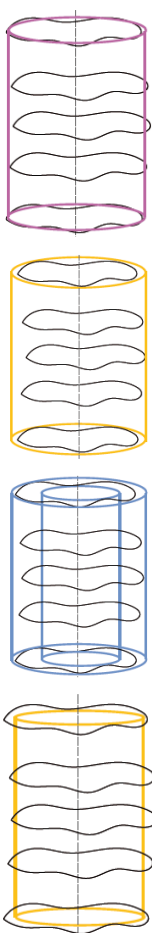
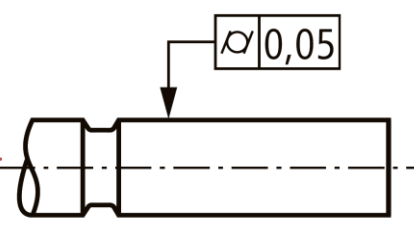
Pozor na odlišnosť

Pozor na označenie metód, ktoré používame na vyhodnotenie odchýlky kruhovitosti napr. LSCI a odchýlky valcovitosti LSCY.

4. Valcovitosť

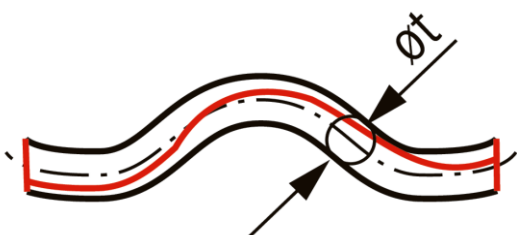
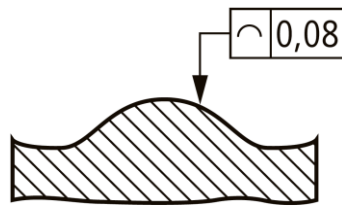
Tolerančná zóna je ohraničená dvoma sústrednými valcami v priestore, ktorých radiálna vzdialenosť je úmerná predpísanej hodnote tolerancie. V závislosti od použitej metódy jeden valec plní funkciu obalového prvku a druhý referenčného prvku. Na vyhodnotenie používame tieto metódy:

- **Maximálny vpísaný valec (MICY)** – referenčný valec je najväčší možný valec vpísaný do zosnímanej oblasti. Používa sa pre hodnotenie vnútorných povrchov.
- **Minimálny opísaný valec (MCCY)** – referenčný valec je najmenší možný valec opísaný okolo zosnímanej oblasti. Používa sa pre hodnotenie vonkajších povrchov.
- **Minimálna radiálna vzdialenosť (MZCY)** – referenčná zóna je tvorená dvomi sústrednými valcami, ktoré zachytávajú zosnímanú oblasť v čo najmenšom rozdiel svojich polomerov.
- **Gaussov kompenzačný valec (LSCY)** – referenčný valec je preložený cez zosnímanú oblasť metódou najmenších štvorcov.

Označenie	Tolerančná zóna	Metóda vyhodnotenia	Príklad
λ		<p>LSCY ←</p> <p>MCCY ←</p> <p>MZCY ←</p> <p>MICY ←</p>	

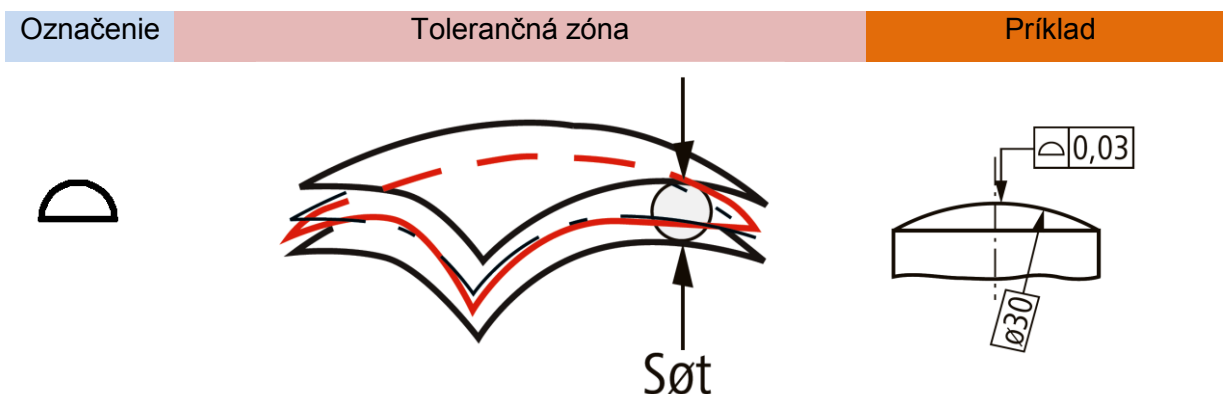
5. Tvar daného profilu

Tolerančná zóna je ohraničená dvoma ekvidištančnými čiarami vzdialenými od seba o hodnotu predpísanú veľkosťou tolerančnej zóny.

Označenie	Tolerančná zóna	Príklad
ω		

6. Tvar danej plochy

Tolerančná zóna je ohraničená dvoma ekvidistančnými plochami vzdialenými od seba o hodnotu predpísanú veľkosťou tolerančnej zóny.

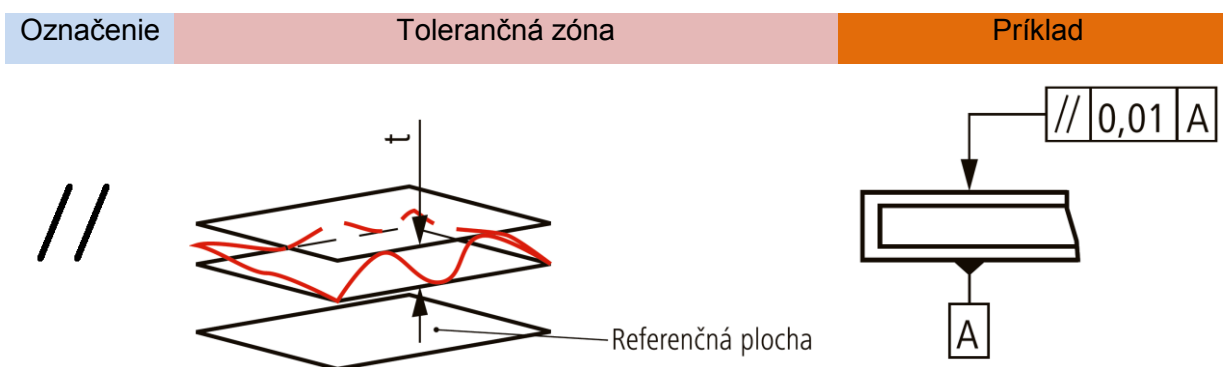


2.2.2.2 Tolerovanie orientácie

Táto skupina tolerancií (rovnobežnosť, kolmost', sklon) patrí medzi vzťažné tolerancie (plocha tolerovanej časti sa vždy vzťahuje k určitej vzťažnej časti prvku alebo k osi), ktoré majú rozhodujúci vplyv na funkčnosť strojov napr. rovnobežnosť vodiacich plôch. Rozdeľujeme na:

1. Rovnobežnosť

Rovnobežnosť tolerovaného prvku je považovaná za správnu, ak tolerovaný prvok leží medzi dvoma rovnobežnými rovinami (vzdialenými od seba o hodnotu predpísanú tolerančným polom) rovnobežnými so základnou rovinou.



2. Kolmost'

Kolmost' tolerovaného prvku je považovaná za správnu, ak tolerovaný prvok leží medzi dvoma rovnobežnými rovinami (vzdialenými od seba o hodnotu predpísanú tolerančným polom) kolmými k základnej rovine.

Označení	Tolerančná zóna	Príklad

3. Sklon

Sklon tolerovaného prvku je považovaný za správny, ak tolerovaný prvok leží medzi dvoma rovnobežnými rovinami (vzdialenými od seba o hodnotu predpísanú tolerančným polom) zvierajúcimi so základnou rovinou (priamkou) predpísaný menovitý uhol.

Označení	Tolerančná zóna	Príklad

2.2.2.3 Tolerovanie polohy

Táto skupina tolerancií (umiestnenie, sústrednosť a súososť, súmernosť) patrí medzi vzťahné tolerancie. Vymedzujú napr. odchýlku osi otvoru od správnej pozície (tolerančná zóna má v tomto prípade kruhový tvar resp. v prípade súososti má tvar valca). Rozdeľujeme ho na:


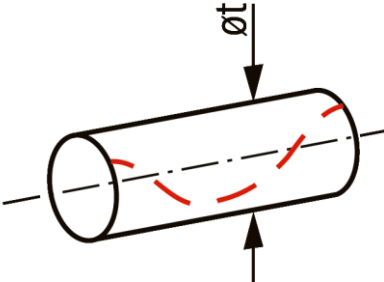
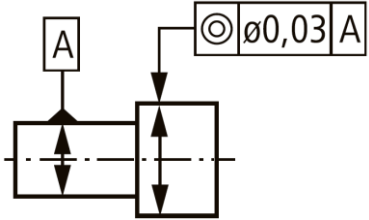
1. Umiestnenie

Umiestnenie tolerovaného prvku je považované za správne, ak os tolerovaného prvku leží vo vnútri valcového tolerančného pola o prieme tolerancie umiestnenia.

Označení	Tolerančná zóna	Príklad


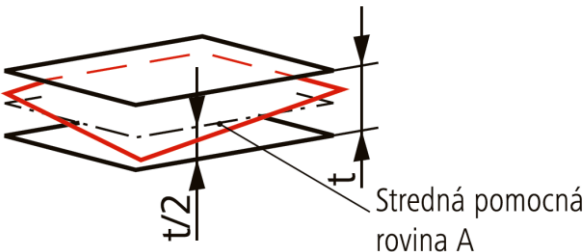
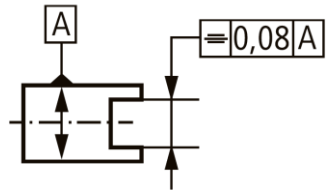
2. Sústrednosť a súososť

Sústrednosť a súososť tolerovaného prvku je považované za správne, ak os tolerovaného prvku leží vo vnútri valcového tolerančného pola o prieme tolerancie sústrednosti a súosovosti, a zároveň je jeho os totožná so základnou osou.

Označenie	Tolerančná zóna	Príklad
		

3. Súmernosť

Súmernosť tolerovaného prvku je považovaná za správnu, ak rovina súmernosti leží medzi dvoma rovnobežnými rovinami (vzdialenými od seba o hodnotu predpísanú tolerančným polom) ktoré sú súmerne umiestnené vzhľadom k základnej rovine súmernosti.


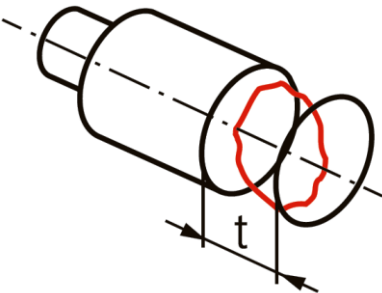
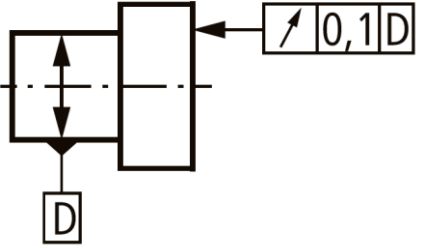
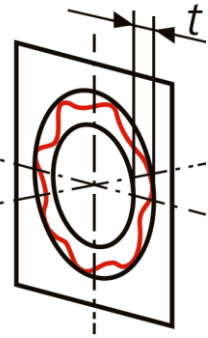
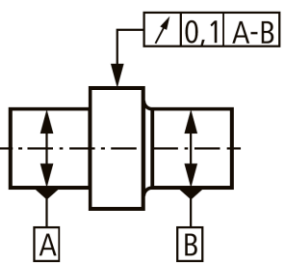
Označenie	Tolerančná zóna	Príklad
		

2.2.2.4 Tolerovanie hádzania

Tolerovanie hádzania (kruhové a celkové) patrí tiež medzi vzťahné tolerancie. Vzťahuje sa k vzťažnej osi, okolo ktorej sa pri kontrole otáča tolerovaný výrobok. Rozdeľujeme ho na:


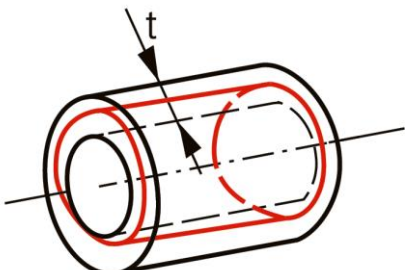
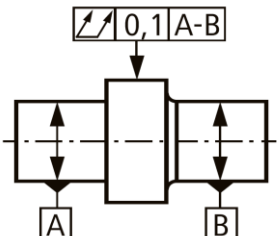
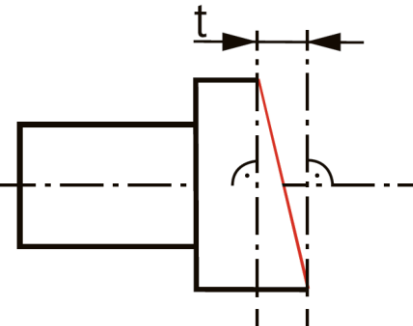
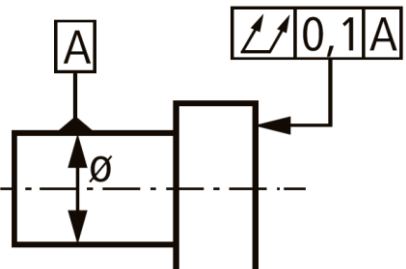
1. Kruhové

Kruhové hádzanie rozdeľujeme na čelné a obvodové. Kruhové obvodové hádzanie je ohraničené dvoma sústrednými kružnicami vzdialenými od seba o hodnotu predpísanú tolerančným polom. Stredy kružníc ležia na základnej osi.

Označenie	Tolerančná zóna	Príklad
		
		Kruhové čelné hádzanie
		
		Kruhové obvodové hádzanie

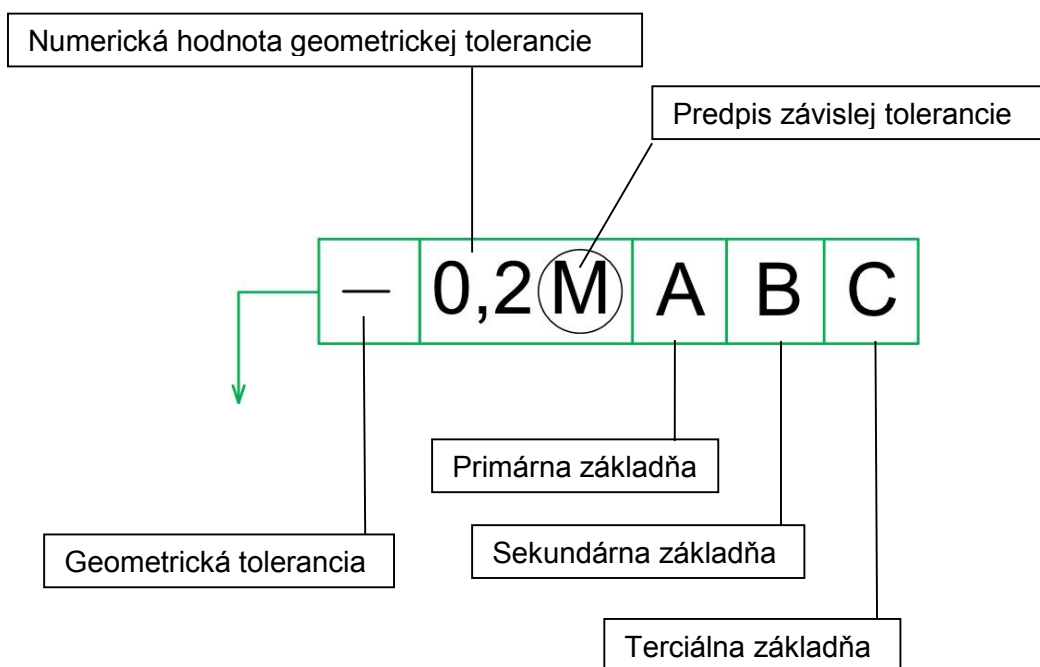
2. Celkové

Celkové hádzanie rozdeľujeme na čelné a obvodové. Celkové čelné hádzanie je ohraničené dvoma rovnobežnými rovinami vzdialenými od seba o hodnotu predpísanú tolerančným polom. Tieto roviny sú kolmé k základnej osi.

Označenie	Tolerančná zóna	Príklad
		
		Celkové radiálne hádzanie
		
		Celkové čelné hádzanie

2.2.2.5 Označovanie geometrických tolerancií

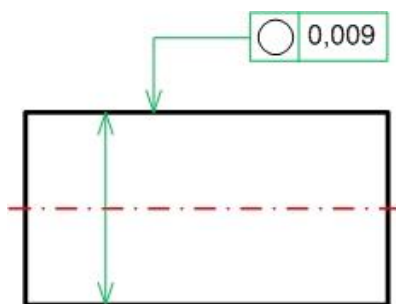
Tolerovanie sa vykonáva predovšetkým na funkčných plochách (z dôvodu zvýšených nárokov na výrobu), kde vrátane presnosti rozmerov a drsnosti povrchu je vyžadovaný aj presný geometrický tvar. Predpisuje sa v technickej dokumentácii normalizovaným spôsobom do pravouhlého rámčeka obr.20, ktorý je rozdelený na dve alebo viac častí.



Obr.20. Tolerančný rámček

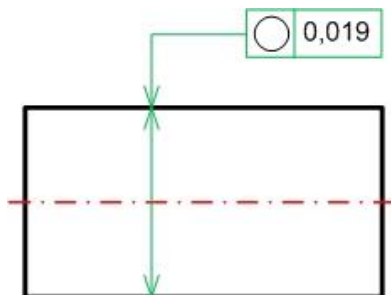
Pri spojení tolerančného rámčeka s tolerovaným prvkom môžu nastať tieto prípady:

- Geometrická tolerancia sa vzťahuje k povrchu tolerovaného prvku obr.21



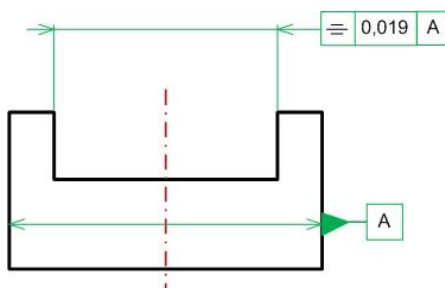
Obr.21 Geometrická tolerancia [32]

- Geometrická tolerancia sa vzťahuje k osi tolerovaného prvku obr.22



Obr.22 Geometrická tolerancia [32]

- Geometrická tolerancia sa vzťahuje k osi súmernosti tolerovaného prvku obr.23



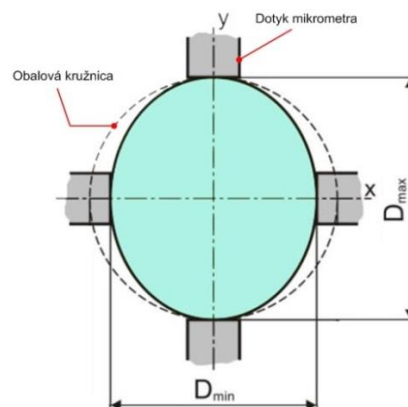
Obr.23 Geometrická tolerancia [32]

2.2.2.6 Meranie vybraných geometrických odchýlok

Správne meranie geometrických odchýlok má zásadný vplyv na zabezpečenie správnej a spoľahlivej funkcie povrchu súčiastky. Vo výrobe sa kontrolujú jednoduchými pomôckami (napr. pravítkami, nožovými uholníkmi, skúšobnými valcami na kolmosť) ale aj zložitými súradnicovými meracími prístrojmi (napr. kontúrografmi, kruhomermi, 3D SMS) v závislosti od vyžadovanej presnosti.

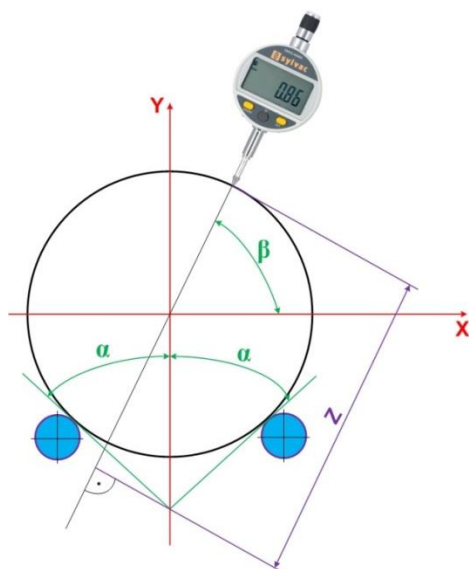
- **Kuhovitost'** povrchu môžeme kontrolovať napríklad týmito spôsobmi:

A. Dvojbodová metóda (obr.24) – meria sa zhodnosť priemerov v sérii rezov za sebou po obvode kruhového tvaru. Táto metóda je najmenej presná z uvedených metód.



Obr.24. Dvojbodová metóda merania odchýlky kruhovitosti

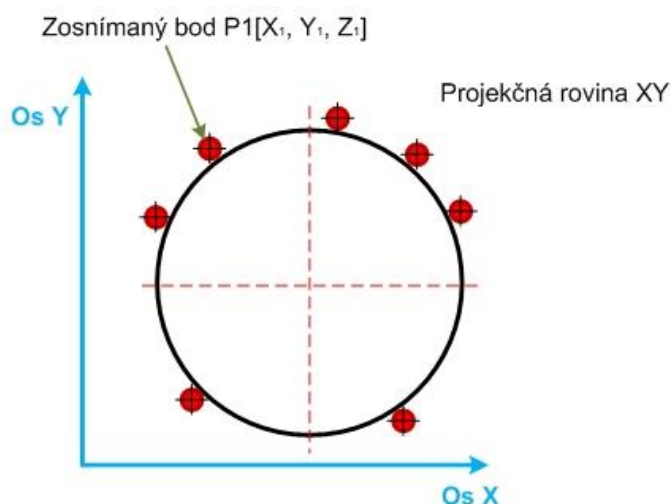
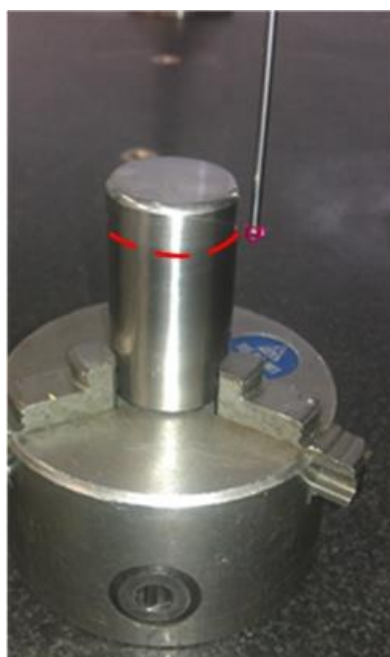
B. Trojbodová metóda (Obr.25) – kontrolovaná súčiastka je uložená a otáča sa v prizme tvaru V, pričom sa sleduje zmena tvaru kontaktným odchýlkomerom.



α – uhol usporiadania oporných bodov.
 β – sklon meracieho prístroja.

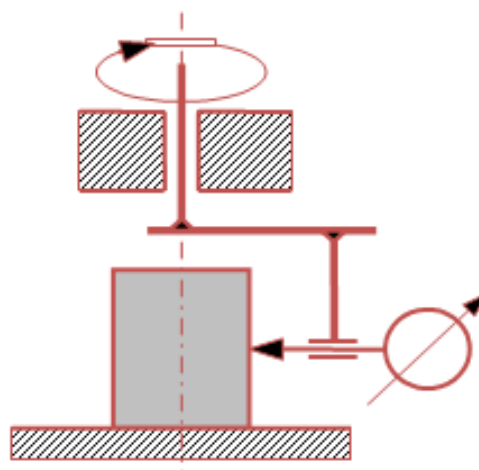
Obr.25 Trojbodová metóda merania odchýlky kruhovitosti

C. Sondou súradnicového meracieho stroja (3D SMS obr.26) – zosnímajú sa body (z obvodu kruhového prierezu súčiastky kontaktnou alebo bezkontaktnou metódou) ktoré sú premietané do príslušnej projekčnej roviny a z nich sa následne vypočíta podľa zvolenej aproximačnej metódy odchýlka kruhovitosti.

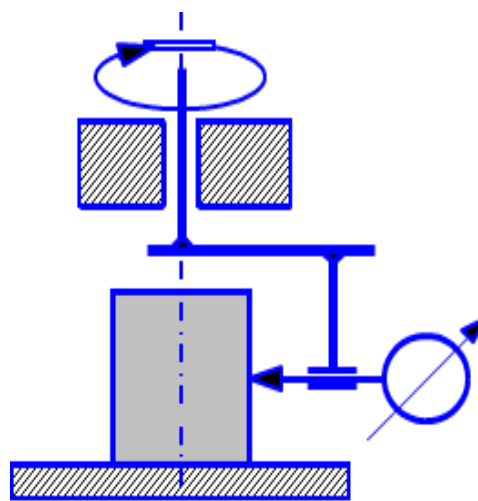


Obr.26 Kruhovitost' meraná na 3D SMS

D. Kruhomerom (obr.27 a obr.28) - kruhovitosť je určená zo zmien polomeru súčiastky vzhľadom ku kruhovej (rotačnej) základni. Kontaktnou sondou sa zosníma veľký počet bodov v jednej rovine po obvode povrchu a z nich sa vypočíta poľa zvolenej aproximačnej metódy odchýlka kruhovitosti. Táto metóda je najpresnejšia z uvedených metód.



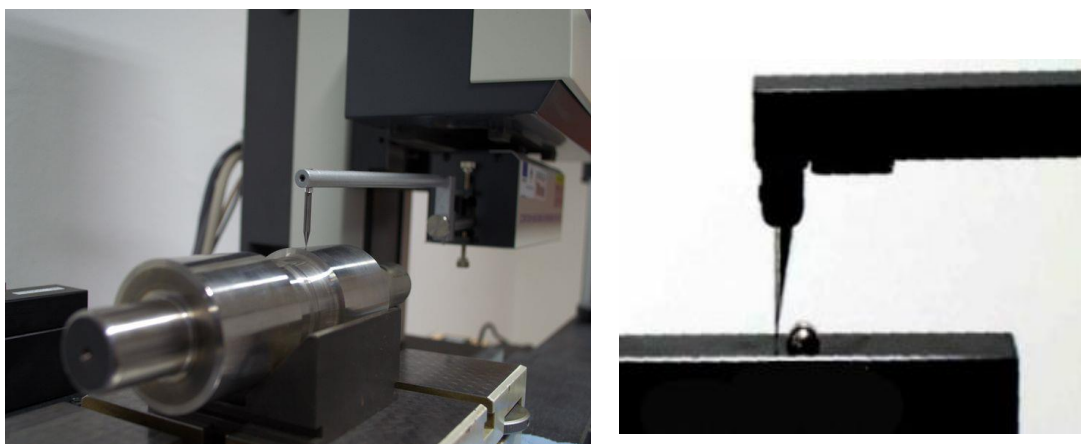
Obr.27 Kruhovitosť meraná na kruhomeri s pevným stolom



Obr.28 Kruhovitosť meraná na kruhomeri s rotačným stolom [18]

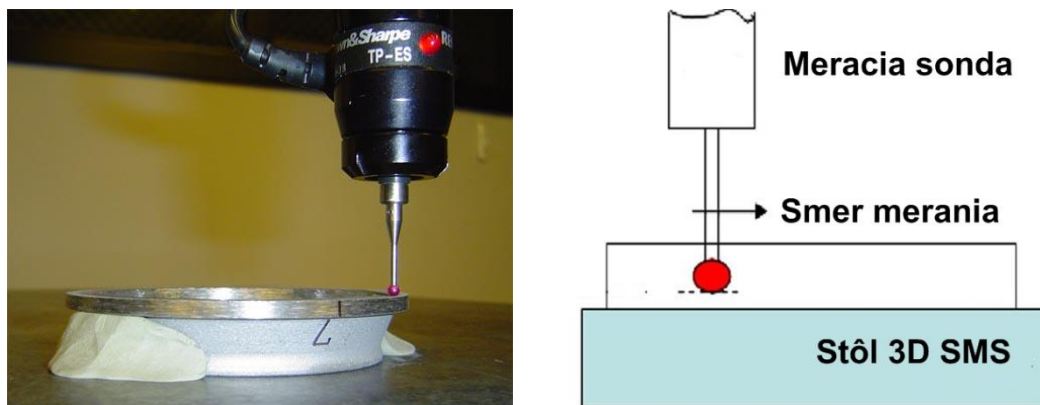
- **Priamosť** povrchu môžeme kontrolovať napríklad týmito spôsobmi:

A. Kontúrografom (obr.29) - kontaktnou sondou sa zosníma veľký počet bodov v jednej rovine po pomyselnjej priamke povrchu a z nich sa vypočíta podľa zvolenej aproximačnej metódy odchýlka priamosti.



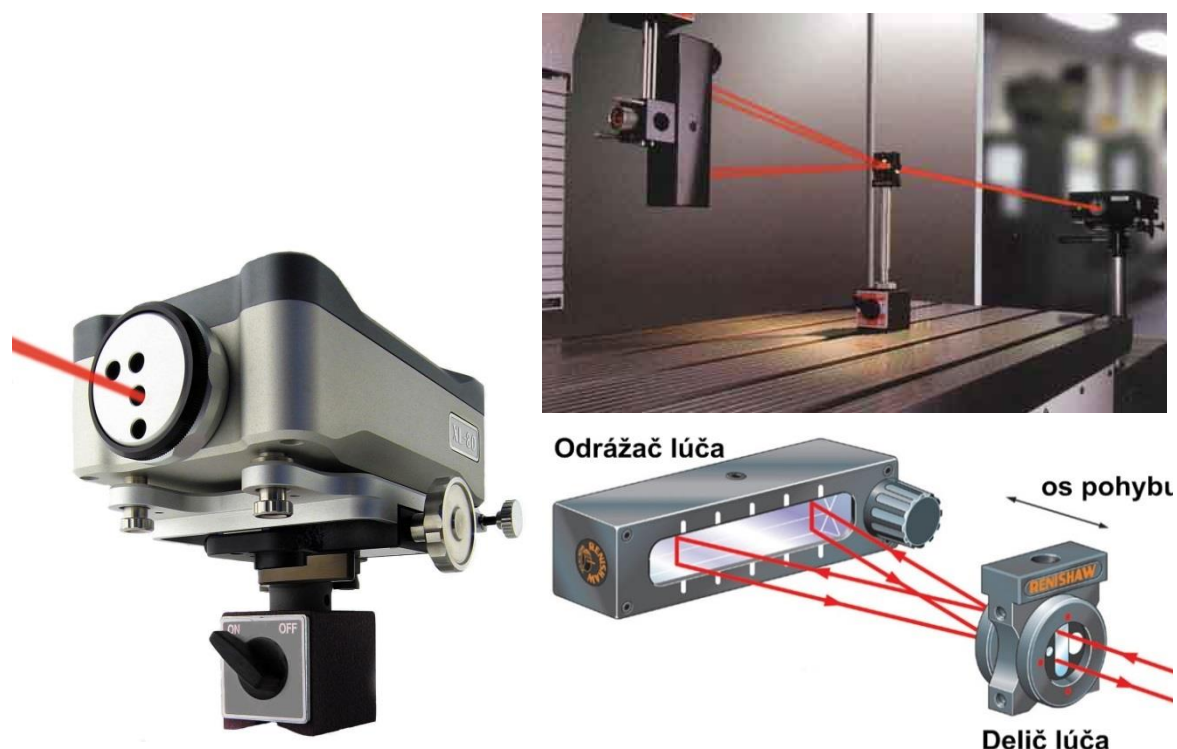
Obr.29. Meranie priamosti povrchu kontúrografom

B. Sondou súradnicového meracieho stroja (3D SMS obr.30) – zosnímajú sa body (po pomyselnjej priamke povrchu súčiastky kontaktnou alebo bezkontaktnou metódou), ktoré sú premietané do príslušnej projekčnej roviny a z nich sa následne vypočíta podľa zvolenej aproximačnej metódy odchýlka priamosti.



Obr.30 Meranie priamosti povrchu 3D SMS

C. Laserovým interferometrom (obr.31) – používa sa na kontrolu obrábacích i meracích strojov. Princíp merania je podobný ako u kontúrografu.



Obr.31 Meranie priamosti povrchu laserovým interferometrom [63]

Meranie **odchýlky rovinnosti a válcovitosti povrchu súčiastok** sa vykonáva pomocou 3D súradnicových meracích strojov (meracích robotov) alebo kontúrografov a kruhomerov, ktoré sú doplnené o tretiu os.



Potrebné si zapamätať

Odchýlky tvaru ovplyvňujú nielen funkčné časti výrobkov ale aj obrábacích strojov.

2.3 Parametry a měření drsnosti povrchu

Současná strojírenská praxe je v období výroby sofistikované produkce charakterizovaná nárůstem požadavků na přesnost a reprodukovatelnost výroby. Vyžaduje se stále širší kooperace. Kontrola struktury povrchu je všeobecně poměrně složitá a správnost dosažených výsledků kontroly je podmíněná splněním souhrnu předpokladů. Optimální kvalita povrchu součástek je jedním z předpokladů správné funkce výrobků (strojů, přístrojů, nástrojů) a významně ovlivňuje životnost součástek. Drsnost povrchu představuje výšku nerovnosti reálné plochy vzhledem k dokonalé a ideálně hladké ploše, přičemž je souhrn nerovností povrchu s relativně malými vzdálenostmi, které obvykle obsahují nerovnosti, vzniklé následkem použité metody výroby nebo jiných vlivů.

Drsnost povrchu lze označit jako jeden z nejdůležitějších parametrů tzv. integrity povrchu. Názvem integrity povrchu je nazýván soubor vlastností povrchové vrstvy, která byla změněna technologickým procesem a má rozdílné vlastnosti vzhledem k základnímu materiálu. Na drsnosti povrchu do značné míry závisí přesnost chodu strojních součástí, jejich hlučnost, doba záběru, ztráty třením, elektrická vodivost, přestup tepla, únavová pevnost, odolnost proti opotřebení, korozi a další vlastnosti. Základním předpokladem pro jakoukoliv klasifikaci povrchu nebo předpověď funkčního chování při daném způsobu zatěžování je tedy co nejpřesnější a nejúplnější popis jeho mikrogeometrie.



Potrebné si zapamatovat

Drsnost povrchu můžeme chápat jako mikronerovnost.

2.3.1 Parametry drsnosti povrchu

Při hodnocení charakteru profilu vychází normy z profilové metody, tzn. hodnotí povrch z profilu povrchu, tzn. z čáry, která vznikne řezem skutečného povrchu definovanou plochou. V praxi se obvykle vybere rovina, jejíž normála je rovnoběžná se skutečným povrchem a má vhodný směr. Vhodný směr je ten, v němž je možné zjistit větší hodnoty parametrů charakteru povrchu (příčný profil).

Skutečný povrch (obr.32) - povrch ohraničující těleso a oddělující ho od okolního prostředí.

Geometrický povrch (obr.35) - ideální povrch, jehož jmenovitý tvar je určený výkresem nebo jinou technickou dokumentací.

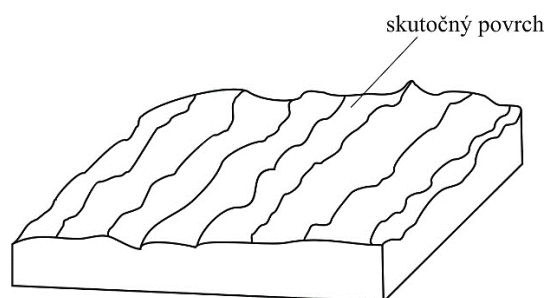
Základní povrch - povrch, od kterého se vyhodnocují parametry drsnosti povrchu.

Kolmý řez (obr.33) - je řez kolmý na základní povrch.

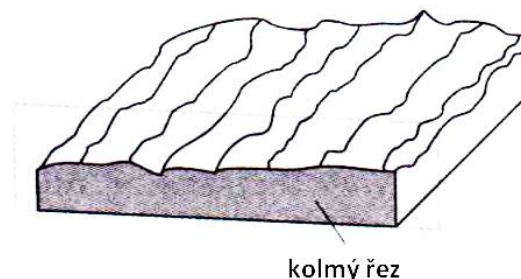
Šikmý řez - řez skloněný k základnímu povrchu.

Profil povrchu - průsečnice povrchu s rovinou.

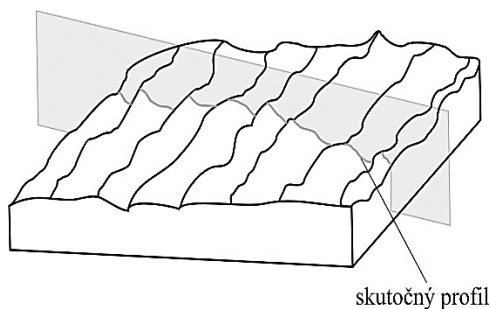
Skutečný profil (obr.34) - průsečnice skutečného povrchu s rovinou.



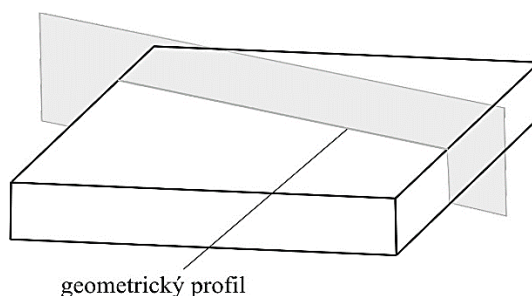
Obr. 32 Skutečný povrch [28]



Obr. 33 Kolmý řez [28]



Obr. 34 Skutečný profil [28]

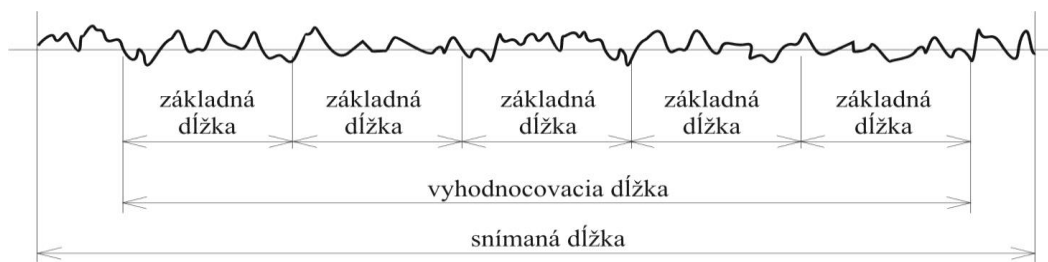


Obr. 35 Geometrický profil [28]

Rozteč příslušných nerovností charakterizuje strukturu povrchu a dělí ji na složky. Složka s nejmenší roztečí tvoří drsnost povrchu, dále existuje složka nazvaná vlnitost povrchu a největší rozteč nerovností určuje základní profil. Geometrické parametry definované normou ISO 4287:

- **R** – parametr vypočítaný z profilu drsnosti,
- **W** – parametr vypočítaný z profilu vlnitosti,
- **P** – parametr vypočítaný ze základního profilu.

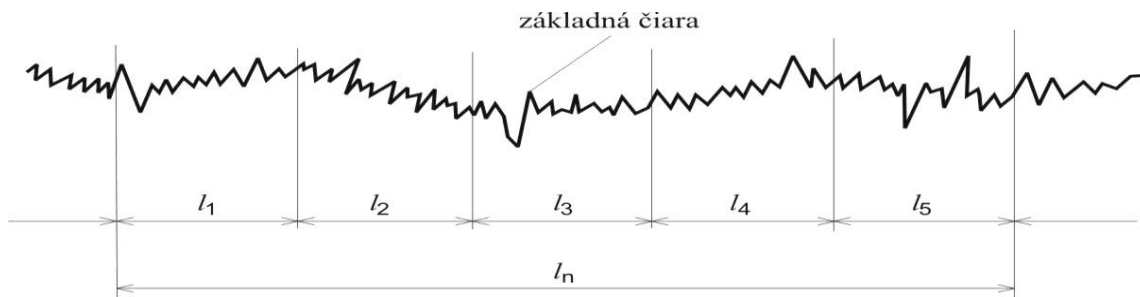
U měřidel na měření drsnosti se používají tři délky: snímaná délka, vyhodnocovaná délka a základní délka. Snímaná délka je celková délka pohybu snímacího dotyku po měřeném povrchu. Na výpočet statistických parametrů se používají údaje, které jsou obsaženy ve vyhodnocované délce, která může obsahovat jednu anebo několik základních délek (obvykle pět).



Obr. 36 – Snímaná, vyhodnocovaná a základní délka [28]

Základní délka l_r (obr.36) – délka základní čáry používaná na oddělení nerovností charakterizujících drsnost povrchu. Měří se v hlavním směru profilu. Základní délka primárního profilu se rovná vyhodnocované délce.

Vyhodnocovaná délka l_n (obr.37) – délka, na které se vyhodnocují hodnoty parametrů drsnosti povrchu a může obsahovat jednu nebo několik základních délek.



Obr. 37 – Základní a vyhodnocovaná délka[28]

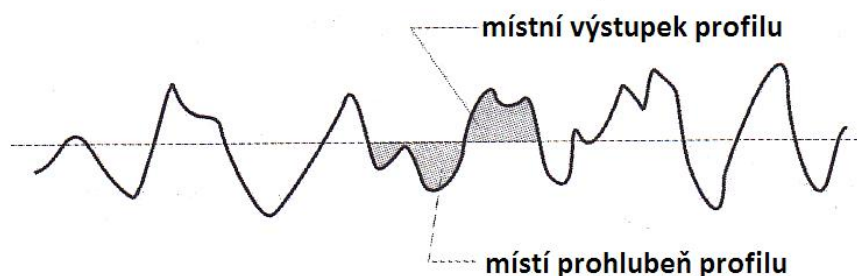
Hodnota souřadnice $Z(x)$ – vzdálenost mezi bodem profilu a základní čarou ve směru měření.

Střední čára nejmenších čtverců profilu (střední čára) m – základní čára, která má tvar geometrického profilu a rozděluje profil tak, že v rozsahu základní délky je součet čtverců úchylek profilu od této čáry nejmenší.

Soustava střední čáry profilu – výpočtový systém používaný na vyhodnocování parametrů drsnosti, ve kterém byla za základní čáru přijata střední čára profilu.

Místí prohlubeň profilu (obr.38) – část profilu spojující jeho dva sousední průsečníky se střední čarou profilu uvažovaná směrem do materiálu (z okolního prostředí do materiálu).

Místní výstupek profilu (obr.38) – část profilu spojující jeho dva sousední průsečníky se střední čarou profilu uvažovaná směrem ven z materiálu (z materiálu do okolního prostředí).

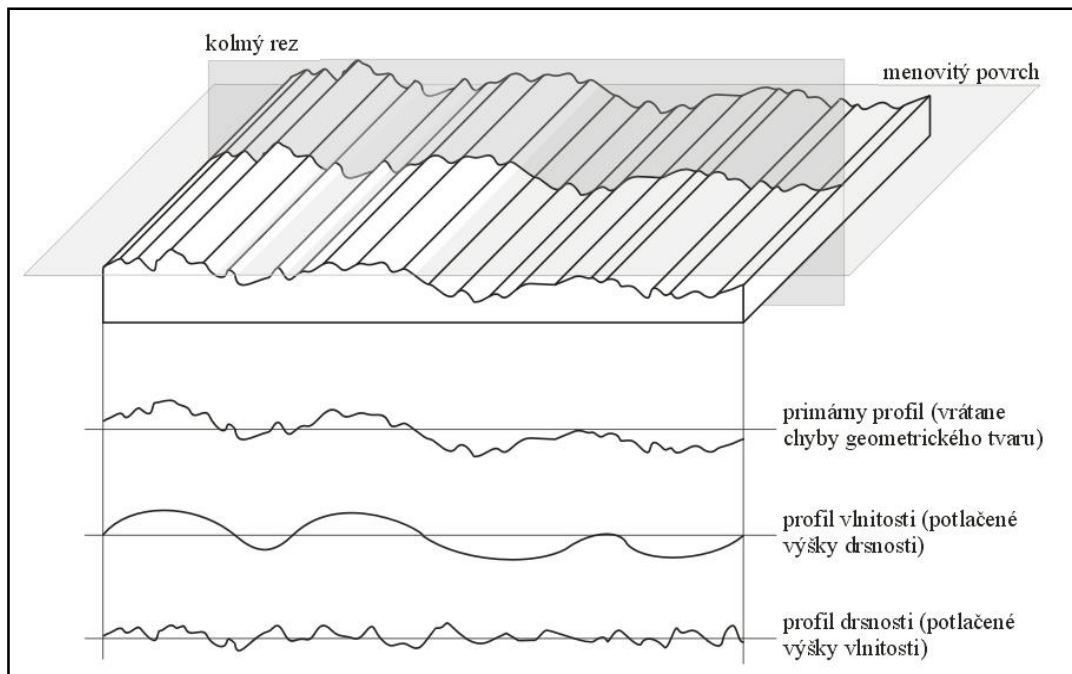


Obr. 38– Místní prohlubeň a výstupek profilu [28]

Základní profil (obr.39) – úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s . Reprezentuje základnu pro číslicové zpracování profilu pomocí filtru profilu a pro výpočet a hodnocení parametrů profilu. Základním profilem není tvar získaný metodou nejmenších čtverců.

Profil drsnosti (obr.39) – profil odvozený ze základního profilu potlačením složek použitého filtru profilu λ_c . Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů drsnosti.

Profil vlnitosti (obr.39) – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λf a filtru λc na základní profil.



Obr. 39 – Zobrazení profilů drsnosti povrchu při použití filtrů [65]

Parametry drsnosti povrchu se určují podle charakteristik:

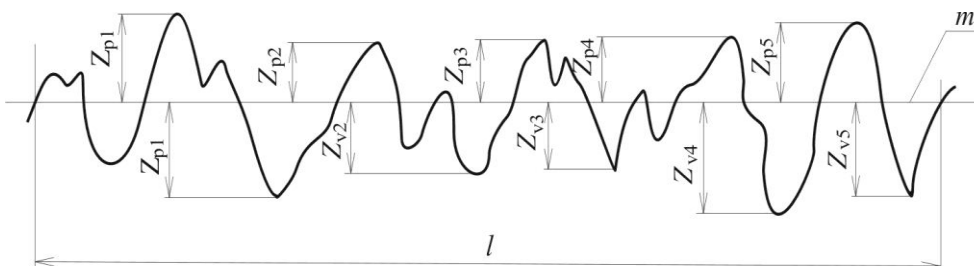
- nerovností profilu ve směru výšky,
- nerovností profilu v podélném směru,
- tvaru nerovnosti povrchu.

2.3.2 Parametry charakterizující nerovnosti profilu ve směru výšky

Výška výstupku profilu Z_p (obr.40) – vzdálenost mezi střední čarou profilu a nejvyšším bodem výstupku profilu.

Hloubka prohlubně profilu Z_v (obr.40) – vzdálenost mezi střední čarou profilu a nejnižším bodem prohlubně.

Výška nerovnosti profilu – je součet výšky výstupku profilu a s ním spojené hloubky prohlubně profilu.

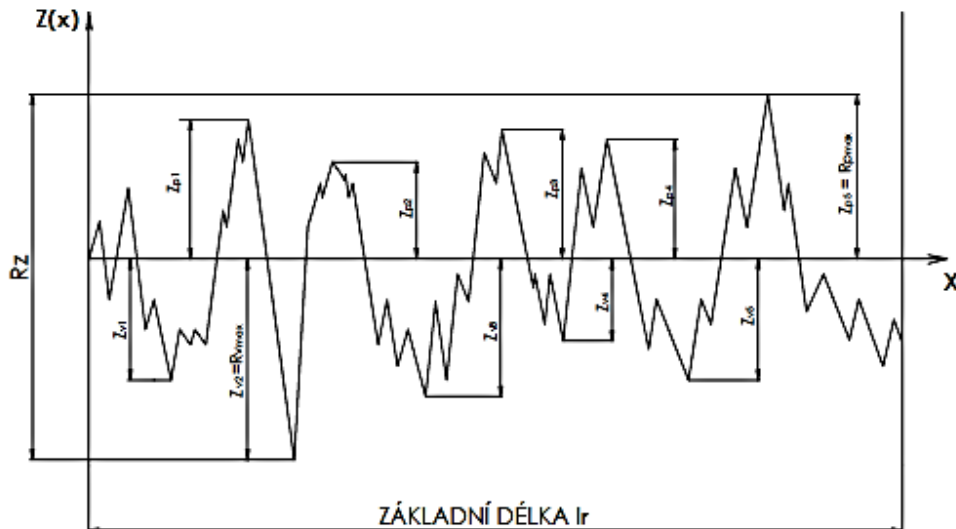


Obr. 40 – Výška výstupků a hloubka prohlubní profilu [65]

Výška největšího výstupku profilu R_p – největší výška výstupku profilu Z_p v rozsahu základní délky.

Hloubka největší prohlubně profilu R_v – největší hloubka prohlubně profilu Z_v v rozsahu základní délky.

Největší výška profilu R_z (obr.41) – součet největší výšky výstupku Z_p a největší hloubky prohlubně Z_v v rozsahu základní délky.

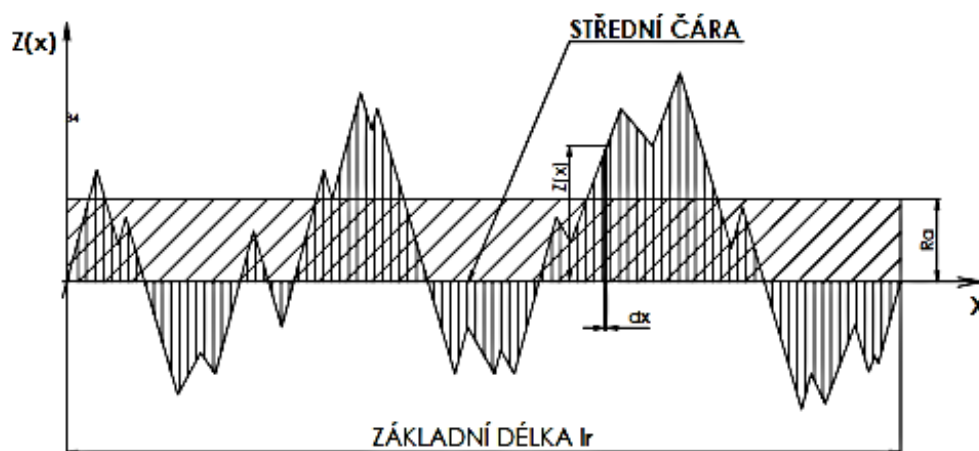


Obr. 41 – Nejvyšší výška profilu drsnosti [65]

Výpočet parametru drsnosti R_z :

$$R_z = R_{v_{max}} + R_{p_{max}} \quad (3)$$

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a (obr.42) – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic v rozsahu základní délky l_r .



Obr. 42 – Průměrná aritmetická úchylka profilu [65]

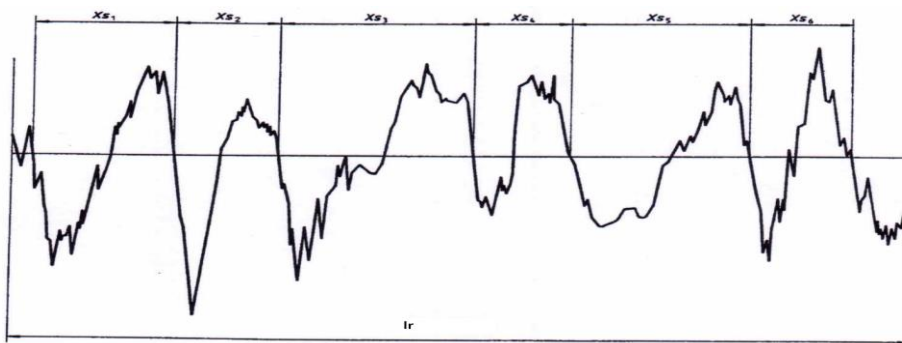
Výpočet parametru drsnosti Ra :

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (4)$$

2.3.3 Parametry charakterizující nerovnosti profilu v podélném směru

Prvek profilu – výstupek profilu a s ním spojená hloubka prohlubně.

Šířka prvku profilu X_s (obr.43) – délka úseku střední čáry profilu obsahující prvek profilu.



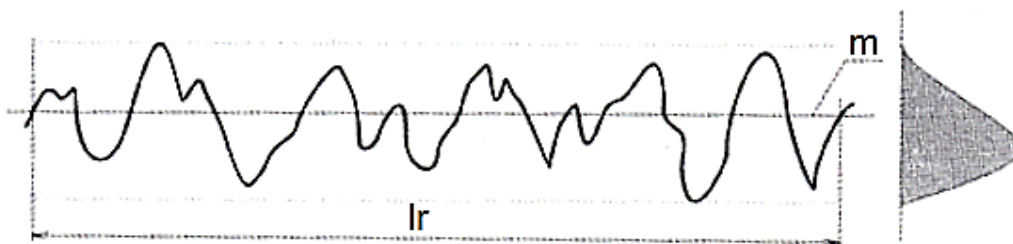
Obr. 43 – Šířka prvků profilu [65]

Průměrná šířka prvku profilu RSm – aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky.

2.3.4 Parametry charakterizující tvar nerovnosti profilu

Koeficient asymetrie profilu Rsk (obr.44) – míra asymetrie hustoty rozdělení úchylek profilu v rozsahu základních délek.

Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu $R\Delta q$ – kvadratický průměr sklonů pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky.



Obr. 44 – Koeficient asymetrie profilu [65]

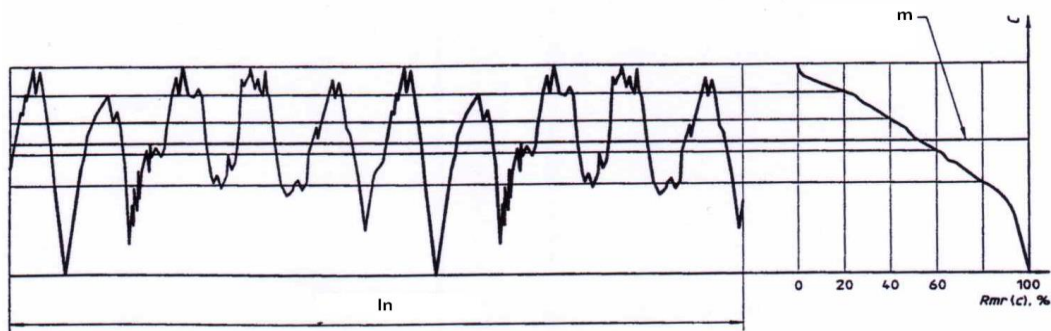
2.3.5 Křivky a odpovídající profily

Materiálový poměr profil (nosný podíl) $Rmr(c)$ – poměr délky materiálu elementů profilu $MI(c)$ na dané úrovni c , k vyhodnocované délce.

$$Rmr(c) = \frac{MI(c)}{l_n} \quad (5)$$

Křivka materiálového poměru profilu (nosná křivka – Abbott Firestoneova křivka) obr.

45- křivka představující materiálový poměr profilu v závislosti na výšce úrovně.



Obr. 45 – Křivka materiálového poměru [65]

2.3.5 Meracie systémy pre kontrolu drsnosti povrchu

Meracie systémy delíme do skupín, v závislosti od toho, akým spôsobom snímajú (charakterizujú) povrch:

- **dotykové** - sú vybavené snímačom, ktorý je priamo v kontakte s meraným povrchom. Vytvárajú 2D charakteristiky a priamo na displeji zobrazuje jednotlivé parametre povrchu,
- **bezdotykové** - medzi referenčným povrchom a vzorkou dochádza k interferencii svetla, ktoré po spracovaní vytvorí topografiu povrchu. Používa sa pre vytvorenie 3D charakteristiky profilu. [18]

2.3.6 Dotyková profilová metóda

Štruktúra povrchu sa meria pomocou prístroja vybaveného snímacím hrotom. Snímací hrot je malého priemeru (zvyčajne $2\mu\text{m}$ až $10\mu\text{m}$) a je súčasťou snímača založeného na indukčnom alebo piezoelektrickom princípe. Pri pohybe hrotu po povrchu dochádza k vychýľovaniu meracieho dotyku a tým dochádza k zmene elektrických veličín, ktoré sa zachytávajú a spracúvajú vo vyhodnocovacej jednotke prístroja. Tá následne hodnoty zapíše do pamäte alebo priamo vytlačí do grafického záznamu. Forma výstupu ako aj počet vyhodnocovaných parametrov sú závislé na type a výbave prístroja. [67] Pri meraní dotykovou metódou sa nehodnotí celá snímaná dĺžka l_t , pretože pri nábehu a výbehu meracieho hrotu zo zóny merania dochádza k vzniku nežiaducich vplyvov. Odstránením týchto vzdialeností (zvyčajne sa jedná o dvjnásobok vlnovej dĺžky) sa získava vyhodnocovaná dĺžka l_n . Vyhodnocovaná dĺžka sa ďalej delí na niekoľko základných dĺžok -zvyčajne na 1 až 5.

2.3.6.1 Vplyv meracej sily hrotu dotykového prístroja

Meracia sila pôsobiaca na hrot nástroja je potrebná k tomu, aby sme dosiahli čo najdokonalejší kontakt s meraným povrchom a tým dosiahli čo najpresnejšie meranie. Okrem pozitívneho pôsobenia (zabraňuje vzniku určitej skupiny chýb) na proces merania, má táto sila aj svoje negatíva a to sú hlavne vznik pružných popr. Trvalých deformácií na skúmanej ploche. Dôvody vzniku pružných a trvalých deformácií sú :

- meraný materiál je plastickejší než materiál hrotu,
- nevhodný tvar meracieho dotyku (príliš špicatý),
- pri neopatrnom nábehu dotyku na povrch súčastí,
- plochy po hrubom opracovaní.

Do určitej miery môžeme zabrániť vzniku deformácii vhodným výberom meracieho zariadenia a dodržaním podmienok merania. Okrem meracej sily má zásadný vplyv na meranie :

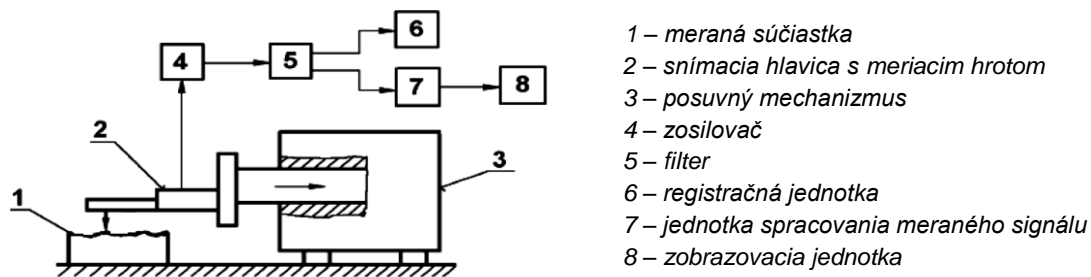
- polomer zaoblenia hrotu,
- vrcholový uhol snímacieho hrotu,
- rýchlosť zmeny meracej sily,
- geometrické usporiadanie snímača.

2.3.6.2 Voľba podmienok merania pri profilovej metóde

Významnú úlohu zohráva nastavenie parametra cut-off. Toto nastavenie priamo vplýva na číselné hodnoty parametrov drsnosti. Ďalším dôležitým nastavením je správne zvolenie základnej dĺžky l_r (u dotkových prístrojoch cut off), tak aby zahŕňala potrebný počet nerovností profilu a vylúčili sa tým nerovnosti s vysokou vlnovou dĺžkou. Veľkosť l_r určuje norma, volí sa z hodnôt 0,08 mm; 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm; 8 mm. Pre získanie čo najobjektívnejších hodnôt sa doporučuje vyhodnocovanú dĺžku voliť ako päťnásobok základnej dĺžky.

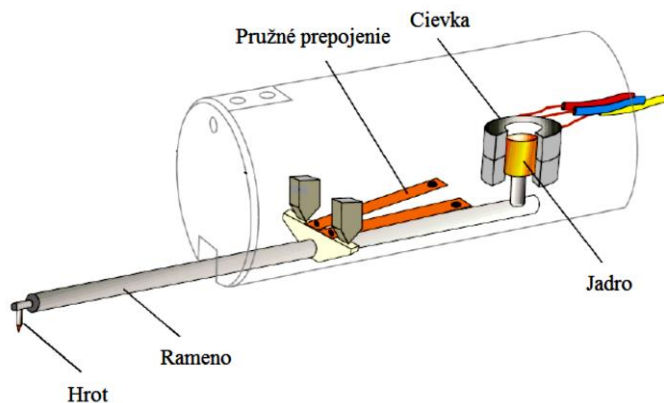
2.3.6.3 Kontaktné (dotkové) prístroje

Väčšinou sa vyrábajú ako mobilné prístroje pre normalizované meranie. Hodnoty merania sú zobrazované na displeji, alebo sa dajú vytlačiť pomocou integrovanej popr. externej tlačiarne. Tieto prístroje sú často vybavené funkciou automatickej kalibrácie snímača, čo zvyšuje presnosť výsledkov. K prístrojom sú v podobe príslušenstva dodávané viaceré druhy dotkových sond čo rozširuje ich možnosti využitia. Praktická je i možnosť pripojenia k počítaču pre analýzu nameraných hodnôt profilu. Medzi dotkové prístroje patria profilometre obr. 46 a profilografy.



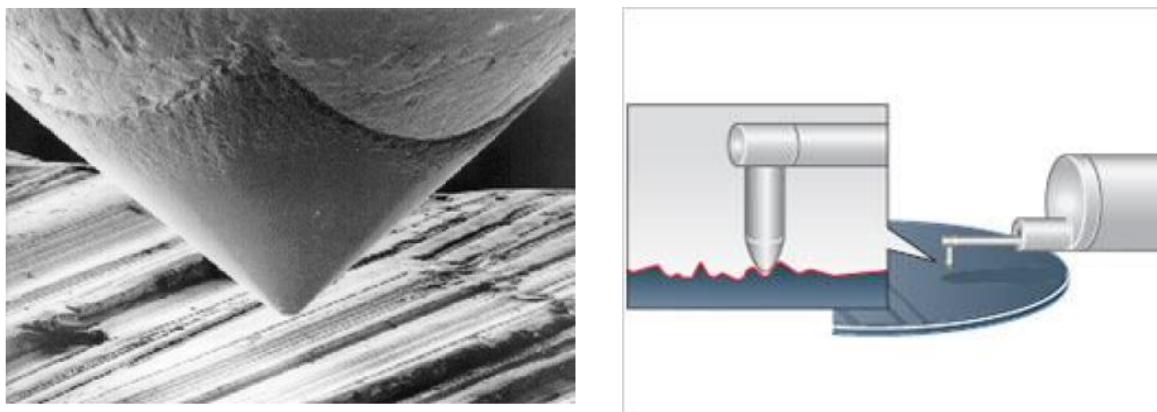
Obr.46 Princíp profilometra [45]

Snímač kontaktného prístroja pracuje na indukčnom obr.47 a piezoelektrickom princípe. [2]



Obr.47 Indukčný snímač dotykového prístroja [2]

Základným prvkom snímača nerovností je diamantový hrot obr.48. Medzi základné parametre hrotu patria polomer zaoblenia a vrcholový uhol.



Obr.48 Diamantový hrot [62]

Princíp kontaktných prístrojov spočíva vo vytváraní mechanického signálu dotykovým hrotom sledujúcim nerovnosti (obr.48) a následnom prevedení tohto signálu na signál elektrický. Elektrický signál je ďalej spracovaný a interpretovaný ako číselná hodnota zvolenej charakteristiky povrchu, popřípade ako grafický záznam profilu. [27]

Snímanie profilu sa realizuje dvoma spôsobmi a to snímaním absolútnym a relatívnym. Pri absolútnom snímaní je merná základňa priama alebo tvarová dráha snímača. Pri relatívnom je základňa realizovaná klznou pätkou pohybujúcou sa po meranom povrchu. [1] Pohyb dotykového hrotu po skúmanom povrchu má byť rovnomerný a rýchlosť musí byť zvolená s čo najväčším ohľadom na dynamické vlastnosti snímacieho systému. Snímaná dĺžka začína v začiatočnom bode (nábeh) prechádza vyhodnocovanou dĺžkou (zväčša 5 úsekov) a končí v koncovom bode. Z koncového bodu sa snímač vracia zvýšenou rýchlosťou do počiatočného bodu. [27]

Pred meraním na kontaktných prístrojoch je nutné splniť tieto podmienky:

- veľkostí nerovností nesmú byť väčšie ako hodnoty maximálneho vertikálneho zdvihu prístroja,
- snímaná dĺžka by mala byť nastavená na päťnásobok základnej dĺžky, plus nábeh a dobeh, ak sa táto požiadavka nesplní výsledok merania bude ovplyvnený,
- meraný objekt je potrebné správne priestorovo orientovať a snímač vhodne umiestniť na meraný povrch,
- tvar snímača sa volí podľa jeho priemeru, dĺžky, možnosti merania, zaoblenia atď.,
- v prípade neprístupnosti miesta povrchu snímaču je možné použiť odtlačok do umelohmotného materiálu a profil snímať z tohoto negatívu.

Pred meraním sa na profilometroch nastavujú tieto pracovné podmienky :

- merací rozsah,
- snímaná dĺžka,
- typ filtra,
- hodnota základnej dĺžky filtra.



Potrebné si zapamätať

Charakter snímaného povrchu (periodický, neperiodický profil) a vhodne zvolená vlnová dĺžka majú zásadný vplyv na kvalitu výsledku merania.

Príklady dotykových prístrojov:

Mitutoyo Surftest - výhodou prístroja Mitutoyo Surftest obr.49 je široké spektrum použitia.

Štandardne je vybavený tlačiarňou na termocitlivý papier, kalibračnou doštičkou, pomocou nej je možné overiť správnu funkciu prístroja a základným snímačom s posuvnou jednotkou. Prístroj sa dá doplniť o ďalšie dotyky a stojan. Mitutoyo Surftest bol vyvinutý za účelom jednoduchého a rýchleho merania parametrov drsnosti. Ide o ľahký prístroj na vyhod-

nocovanie primárnych profilov, parametrov drsnosti a vlnitosti. Použiť sa dá na väčšine povrchov. [56]



Obr.49 Mitutoyo Surf test [53]

SURFTES SJ-201 P - prístroj má nízku hmotnosť, je kompaktný a pracuje na princípe vodivosti čo umožňuje hodnotiť drsnosť rôznych povrchov. SURFTES SJ-201 P je vybavený procesorom a LCD displejom, ktorý zobrazuje namerané hodnoty a nastavené parametre. Dotykový snímač je vybavený sklopným senzorom diamantového tvaru s pracovným zaťažením 4mN. Meranie drsnosti pozostáva z motorického pohybu senzoru po testovanom povrchu. Prístroj môže byť napájaný sieťovým adaptérom alebo vstavaným akumulátorom. Akumulátor umožňuje meranie na miestach, kde nie je možné mať pripojený prístroj na AC zdroj. [58]

Štandardne je SJ-201P obr.50 vybavený sériovým rozhraním RS-232C a výstupom Digmatic. Namerané údaje je možné ukladať z prístroja do PC. Prístroj je kompatibilný v súlade s normami DIN, ISO, ANSI, JIS a je schopný merať nasledujúce parametre – Ra, Ry, Rz, A1,A2 a mnohé ďalšie.[31]



Obr. 50 Surf test SJ-201 [55]

Základné vlastnosti prístroja:

- obsahuje RS232 konektor výstupu pre tlačiareň alebo PC,
- pracovný rozsah: $R_a = 0,01 - 75 \mu\text{m}$, R_y a R_z v rozsahu 0,02 až 300 μm ,
- vzorkovacia dĺžka: $n = 1 - 5$,
- dĺžka posuvu: 0,25; 0,8 a 2,5 mm,

2.3.7 Metóda bezdotyková

Princíp týchto metód vychádza z predstavy, že povrch je zložený z fázových nehomogenít. Pri dopade svetelného zväzku na takýto povrch dochádza k interakcii a k následnému zrkadleniu lúčov. Fázové rozdiely medzi jednotlivými bodmi drsného povrchu je možné zviditeľniť pomocou rozostrenia obrazovej roviny pri premietnutí obrazu osvetleného povrchu. Základným zdrojom informácií o štruktúre povrchu je plocha.

Medzi základné hodnotené geometrické parametre patria :

- S - parameter: parameter používajúci dáta z definičnej plochy.
- V - parameter: parameter objemu materiálu alebo prázdneho materiálu používajúci dáta z krivky plošného pomeru materiálu.

Metódy bezdotykové nachádzajú uplatnenie hlavne tam, kde sa nedá použiť dotykové snímanie z dôvodu poškodenia povrchu hrotom (napr. jemne opracovane plochy).

Ďalej sa meracie systémy delia na základe veľkosti (prenosné, stacionárne), počtu vyhodnocovaných parametrov, od typu filtra atď.

2.3.7.1 Bezdotykové prístroje

Existuje viacero druhov v závislosti na princípe snímania napr. optické, elektrónové, laserové, ultrazvukové (v tejto oblasti neustále dochádza k rozširovaniu nových princípov). Najviac rozšírené prístroje v praxi sú optické. Vyrábajú sa ako univerzálne zariadenia. [13] Pri optoelektronických snímačoch sa zo zmeraného povrchu získava obraz, ktorý sa ďalej spracúva a hodnotí. Na zníženie náročnosti na obsluhu sa nahrádzajú meracie mikroskopy kamerovými systémami. Zosnímaný obraz je digitalizovaný a následne je spracovaný buď obsluhou alebo automaticky, softvérom dodávaným k prístroju.

Pri optických prístrojoch je dôležité správne nastaviť kontrast obrazu a osvetlenie zobrazovanej časti pre identifikáciu hrán a následne získanie bodov. Tieto snímače nachádzajú uplatnenie tam, kde sa nedá použiť metóda dotyková (povrch pamätí, súčiastky z plastov).

Princíp optických prístrojov je založený na využití svetelného lúča, ktorý sa odráža alebo rozptyľuje na skúmanom povrchu. Veľkou výhodou týchto prístrojov je veľmi krátky čas merania, nie je potreba robiť korekciu snímacieho hrotu, schopnosť merať zložité povrchy. Medzi nevýhody sa zaradzuje možnosť straty dát vplyvom rýchlej zmeny profilu, vysokej alebo nízkej odrážavosti povrchu. Softvér dodávaný s meradlom dokáže niektorým chybám zabrániť. [2]

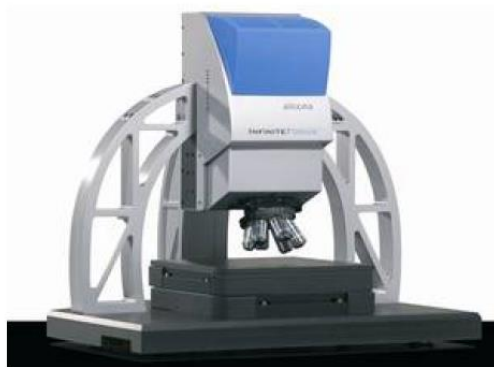
Ďalším zástupcom bezdotykových prístrojov sú laserové. Princíp získania obrazu povrchu spočíva v hodnotení tvaru a polohy čiary tvorenej laserovým lúčom. Posúvaním lasera po povrchu dochádza k zaznamenávaniu bodov povrchu vysokou rýchlosťou. Získava sa tak veľké množstvo bodov tvoriace povrch dielu. Výhodou je získanie informácií o štruktúre nielen na povrchu, ale v celom objeme pozorovanej súčiastky.

Dôležitým aspektom pri zavádzaní meraní optickým prístrojom je situácia keď nemôžeme použiť dotykové snímanie povrchu. Jedná sa o technické povrchy niektorých nových konštrukčných materiálov, ako sú napríklad časti pamäťových zariadení sústavy mikrorozmerových šošoviek atď. [55]

Príklady prístrojov bezdotykovej metódy:

InfiniteFocus (obr.51)- je optické 3D meracie zariadenie pre kontrolu povrchu v mikro a nano úrovniach. Vybavené je funkciami pre priestorové meranie, analýzu povrchu a charakterizáciu. Prístroj meria povrchy s vertikálnym rozlíšením až 10 nm, vďaka tomu je tento prístroj ideálny pre štúdium povrchu ako homogénnych tak i kompozitných materiálov. Meranie sa vykonáva priamo v optickom snímku.[54]

Princíp fungovania kombinuje malú hĺbku ostrosti optického systému s vertikálnym snímaním pre získanie topografickej informácie pomocou zaostrenia. Zariadenie okrem použitia v labo-ratóriách môže byť zaradené aj do výrobnjej sféry. Vyžaduje však zaškolený personál. [54]



Obr.51 Prístroj InfiniteFocus [54]

Talysurf CCI Lite (obr.52) - ultrapřesný 3D automatický optický měřicí systém vytvářející spolehlivé výsledky a vysoký výkon v praxi. Aplikaci nachází ve výrobní i výzkumné sféře. Talysurf CCI Lite představuje progresivní typ interferometrického přístroje. K vyhledávání vrcholů povrchu používá korelační algoritmus a fázové polohy interferenčního modelu, vytvořeného přesnou optickou snímací jednotkou. [1] Talysurf CCI Lite obr.18 má rozsáhle použití a je aplikovaný tam, kde je nutné dosahovat vysoké přesné 3D analýzy profilu. Různé objektivy umožňují měření mnohých typů povrchů. [1] Významnou předností přístroje je univerzálnost použití. Všechny povrchy leštěné nebo hrubé, zakřivené nebo rovné s odrazivostí 0,3 až 100% mohou být měřeny v jednom algoritmu, bez změny režimu. Dají se měřit povrchy takmer všech materiálů včetně skla, kovů, polymerů a plastů. [1]



Obr.52 Talysurf CCI Lite [1]

3 ZÁKLADY MERANIA NA SMS

Vysoká úroveň výpočtovej techniky nám ponúka možnosti on-line prepojenia obrábacieho a meracieho stroja v rámci jednej uzavretej regulačnej slučky. Ak merací stroj v automatizovanej výrobe zistí pri kontrole výrobku, že pri niektorých kontrolovaných rozmeroch došlo k prekročeniu predpísaného tolerančného pásma, okamžite o tom informuje riadiaci systém obrábacieho centra (ďalej len OC), ktorý následne vykoná príslušné opatrenia na odstránenie tohto nedostatku (napr. vykoná príslušné korekcie dráhy nástroja). Takáto zostava sa môže ešte doplniť o automatizované zariadenia na operačnú manipuláciu (napr. medzioperačný zásobník).

Zaradením súradnicových meracích strojov (ďalej len SMS) do výroby sa odrazí aj v materiálovom toku obrobkov. Ich integrácia sa realizuje v zásade:

- úplným prepojením na systém výroby,
- samostatným dopravným systémom.

Úplné prepojenie sa vyznačuje krátkymi dopravnými časmi. Meraný objekt sa na SMS dopravuje priamo na technologických paletách. Z dôvodu korektnosti nameraných údajov by mali byť na uvedených paletách merané objekty upnuté rovnako, ako boli upevnené v obrábacom centre.

Samostatný transportný systém má výhodu v tom, že SMS nie sú viazané tlakom výrobného zariadenia.

Meracie stroje, ktoré sú priamo začlenené vo výrobnom procese (sú umiestnené vo výrobných halách), musia byť opatrené vhodnými stavebnými úpravami, ktoré ich chránia proti otrasom z okolitého prostredia. Často sú tieto stroje vybavené samonivelačnými pneumatickými tlmičmi chvenia. Takýmto spôsobom sa zabezpečujú SMS vo výrobe.

Výrobky pred meraním musia byť očistené. Na zabezpečenie potrebnej čistoty meranej súčiastky sa používajú CNC práčky. Meraná súčiastka musí byť aj tepelne temperovaná (zvyčajne jej umiestnením v klimatizovanej miestnosti). Počas merania je veľmi dôležité zabezpečiť zhodnosť teplôt meranej súčiastky, prostredia a vlastného SMS. Pri meraní vo výrobe sa zvykne požadovať teplota 20 ± 2 °C pri maximálnej časovej zmene v rozmedzí 0,5 až 1 °C.h⁻¹. Integrácia SMS priamo do výroby vyžaduje, aby boli splnené tieto podmienky:

- malá neistota merania,
- krátke meracie časy,
- odolnosť proti vonkajším vplyvom,
- vybavenosť dodatočnými zariadeniami (napr. automatická výmena paliet, on-line a off-line programovanie).



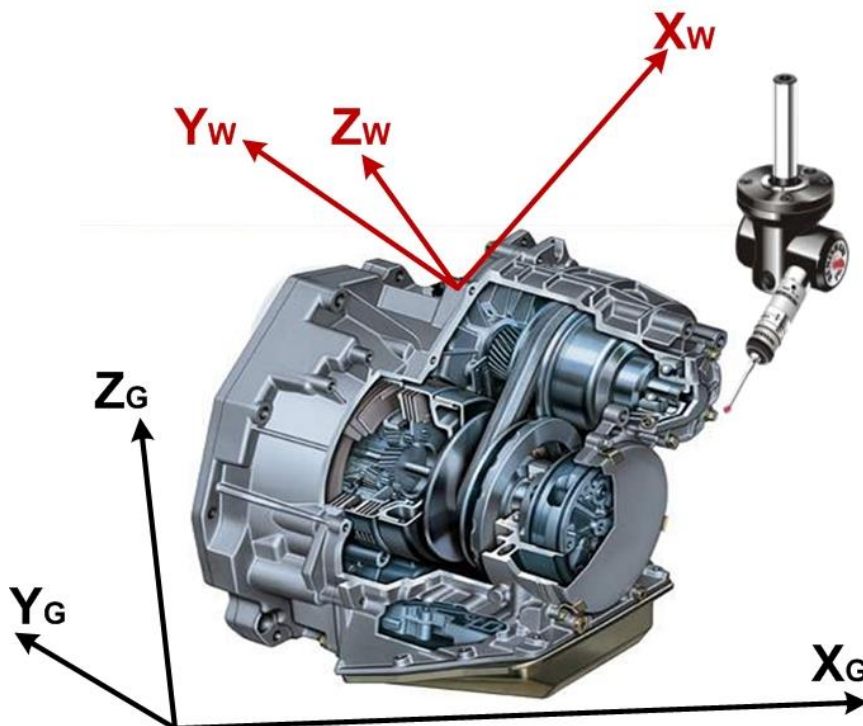
Potrebné si zapamätať

Základom súradnicového merania je zistenie polohy zosnímaného bodu (jeho súradníc v príslušnom súradnicovom systéme).

3.1 Stacionárne kontrolné systémy

Meracia technika je neoddeliteľnou súčasťou každého výrobného procesu. Významnou podporou v tomto procese sú aj SMS. Tieto stroje sú definované ako meracie systémy, ktoré sú určené na meranie priestorových súradníc (súradnicové meranie) s prostriedkami pre pohyb snímacieho systému a schopnosťou určovať priestorové súradnice na povrchu meraného predmetu umiestneného v meracom priestore stroja. Vyznačujú sa vysokou univerzálnosťou a flexibilitou. Takéto meracie stroje pracujú s dvomi súradnicovými systémami [13]:

- súradnicový systém stroja,
- súradnicový systém meraného predmetu.



Obr. 53 Súradnicový systém stroja a súčiastky [18]

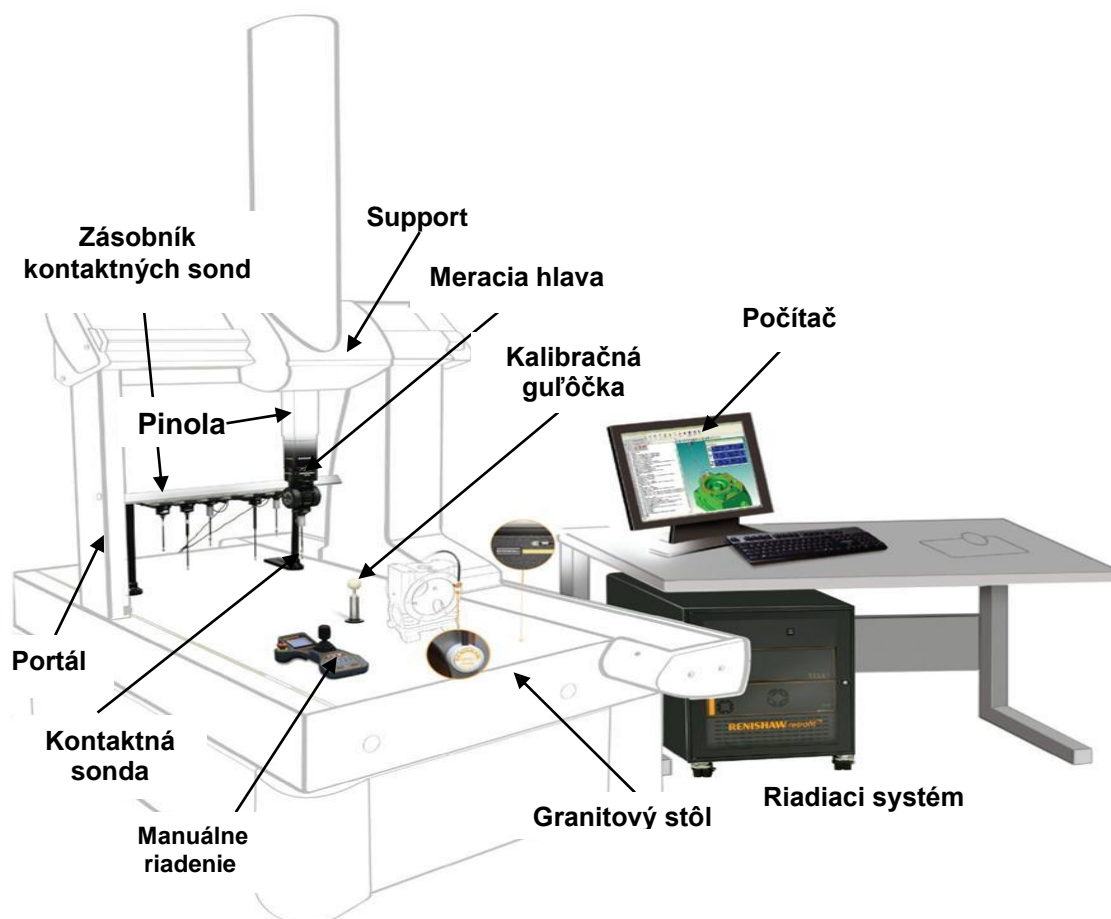
Ak sa meria dĺžka na konkrétnej súčiastke, súradnicový systém súčiastky sa vytvára zmeraním referenčných prvkov po obvode súčiastky (obr.53). Musíme však rozlišovať medzi súradnicovým systémom prístroja (X_G , Y_G , Z_G) a súradnicovým systémom súčiastky (X_W , Y_W , Z_W). Na meranej súčiastke môže byť niekoľko súradnicových systémov.



Potrebné si zapamätať

Súradnicové meracie stroje pracujú v dvoch súradnicových systémoch:

- súradnicový systém meracieho stroja,
- súradnicový systém súčiastky



Obr. 54 Časti súradnicového meracieho stroja [47]

Každý takýto stroj zvyčajne pozostáva z čiastkových subsystémov (obr.54), ktoré sú navzájom prepojené. Vo všeobecnosti sa od nich očakáva:

- absolútne a inkrementálne (meranie rozmeru po jednotlivých krokoch) meranie rozmeru v smere osí x, y a z,
- meranie vzdialenosti medzi definovanými bodmi,
- určenie obrysovej krivky z nameraných bodov,
- generovanie kriviek chýb,
- určenie geometrických odchýlok tvaru a polohy,
- automatické porovnanie požadovanej a skutočnej hodnoty,
- kontrola združených súčiastok,

- výpočet priesečníkov osí,
- výpočet stredov a priemerov otvorov rôznymi metódami,
- zistenie sklonu osí otvorov,
- zistenie stredy oblúkov,
- automatické nastavovanie nameraných objektov,
- automatická korekcia na dotyk,
- transformácia súradníc (karteziánske - polárne).

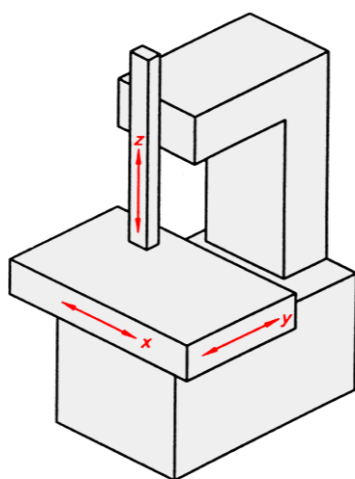
3.1.1 Geometrické rozdelenie stacionárnych súradnicových meracích strojov

V súčasnosti existuje veľké množstvo SMS. Až na niektoré výnimky všetky používajú konštrukčné riešenie s polohovaním v karteziánskej súradnicovej sústave. V súlade s normou sa meracie stroje dajú rozdeliť do štyroch základných geometrických usporiadaní [17]:

- stojanový typ (obr.55),
- výložníkový typ (obr.56),
- portálový typ (obr.57),
- mostový typ (obr.58).

Stojanový typ

Meraný predmet sa upína na stôl, ktorý sa pohybuje v smere osí x a y. Meracia pinola sa pohybuje v smere osi z. Stroje takéhoto typu sa vyhotovujú laboratórne a sú najpresnejšie.



a)



b)

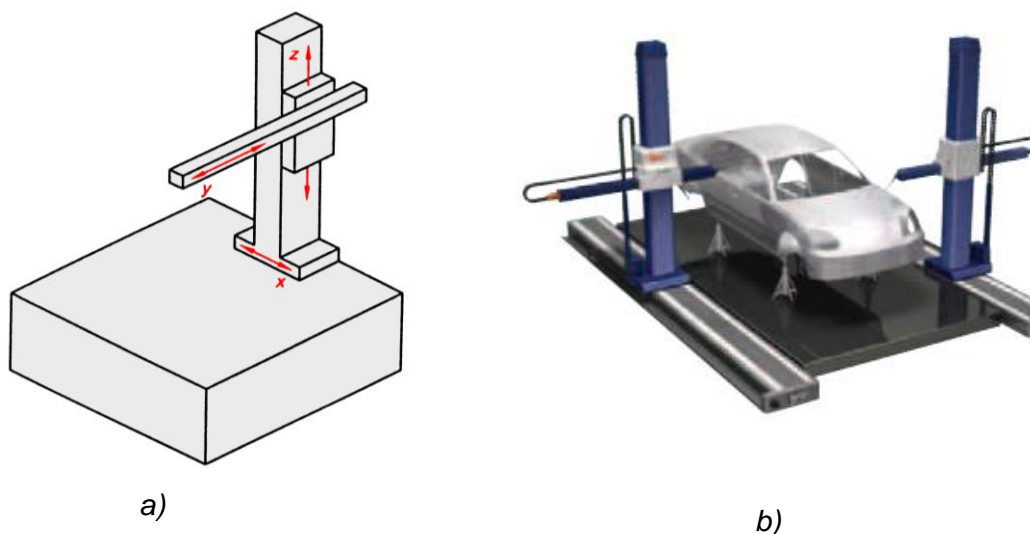
Obr. 55 a) Príklad stĺpového SMS [31], b) stojanový merací stroj na vodiacom nosníku

Sú vhodné pre malé rozsahy merania a môžu byť vybavené kruhovým stolom s uhlovou stupnicou. Ich charakteristickými znakmi sú:

- tuhá konštrukcia,
- dobrý prístup k meranému predmetu.

Výložníkový typ

Meraný predmet sa upína na stôl, pričom meracia pinola na výložníku sa pohybuje v smere osi y a kolmo v osi x. V osi y sa mení vyloženie pinoly od vodiacej plochy, a preto je tu nutné vyvažovanie. Vyznačujú sa dobrým prístupom k miestu merania.

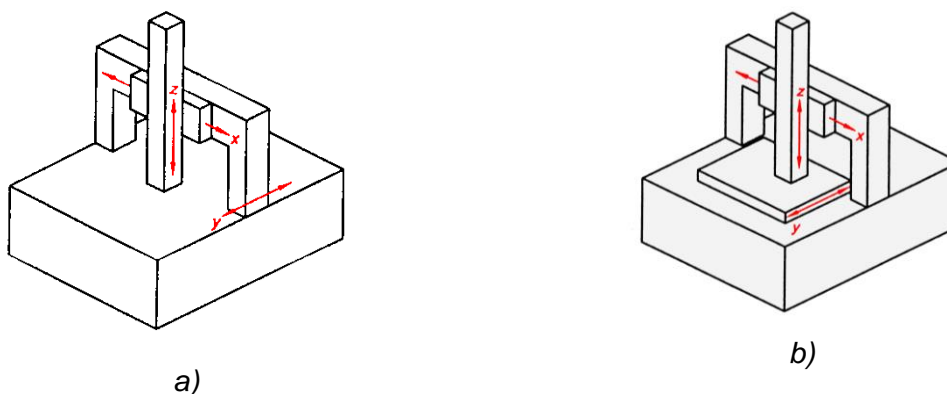


Obr. 56 Príklad výložníkového SMS [31] a) jeden stroj, b) duplexné prevedenie

Portálový typ

Patria k najrozšírenejším 3D SMS pre stredné a veľké rozsahy merania. Ich charakteristickými znakmi sú:

- vysoká tuhosť konštrukcie (umožňuje vysokú presnosť merania),
- obmedzený prístup k meranému predmetu.



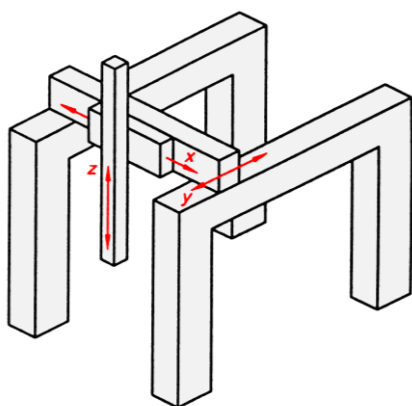
Obr. 57 Príklad SMS a) s pohyblivým portálom, b) s pevným portálom[31]

Pri uvádzanom type stroja sa používajú dve prevedenia:

- a) **Pohyblivý portál** - veľký portál sa pohybuje nad pevným stolom, prístup do meracieho priestoru je obmedzený. Väčšina meracích strojov má takéto usporiadanie.
- b) **Pevný portál** - portál je pevný a stôl sa pohybuje v osi x.

Mostový typ

Sú charakteristické svojou veľkosťou. Merací rozsah v osi x je až 24m. Používajú sa pre meranie rozmerovo najväčších súčiastok, najčastejšie v automobilovom a leteckom priemysle na meranie veľkých predmetov.



a)



b)

Obr. 58 Príklad mostového SMS a) Schematické znázornenie [31], b) Mostový SMS stroj firmy LK [59]



Potrebné si zapamätať

Výber vhodnej konštrukcie SMS závisí od charakteru meranej súčiastky a prostredia, v ktorom bude pracovať.

3.2 Multisenzorové súradnicové meracie stroje

U meracích strojoch takéhoto typu sa používajú rôzne kombinácie meracích sond (napr. optická sonda, mikrosonda, mechanický snímač a iné). Zo základných vlastností sond vyplýva ich hlavné ťažisko použitia. Dôležitými rozlišovacími znakmi v súvislosti s použitím týchto sond je veľkosť a druh meraných geometrických prvkov objektu a tiež vhodnosť k rýchlemu zachycovaniu veľkého množstva bodov (skenovanie). Aby bolo možné riešiť komplexné meracie úlohy, je väčšinou potrebné používať viacero typov meracích sond v priebehu jedného merania. Zvyčajne môžu byť v dvoch prevedeniach a to ako stacionárna (napr. video check, tomograf) alebo mobilné (napr. FARO).

3.2.1 Počítačová tomografia (metrotomografia)

Medzi najnovšie spôsoby merania v praxi patrí i metrotomografia (obr.59). Súradnicové meracie stroje, ktoré využívajú túto technológiu sú väčšinou konštruované ako multisenzorové stroje. Zvyčajne primárna sonda (röntgen) býva doplnená o kombináciu ďalších sond (kontaktná sonda, laserová sonda).



Obr. 59 Werth Tomoscope – 3D röntgenový merací prístroj [24]

Systém tomografu pracuje tak, že meraný objekt je umiestnení na otočnom stole v takej polohe, aby ležal v lúčoch vychádzajúceho z röntgenového žiariča. Jeho profil je zachytávaný na detektore, ktorý ho prepočíta z röntgenového obrazu do digitálnych 2D obrazov pre ďalšie spracovanie.

Trojrozmerný obraz vzniká otáčaním objektu o 360° okolo vlastnej osi (na otočnom stole zariadenia) a takýmto spôsobom získané údaje sa prepočítajú na 3D objemový model.

Slovenskej republike sa touto problematikou zaoberajú hlavne dve firmy a to Zeiss (program CALYPSO) a Werth (program Winwerth).

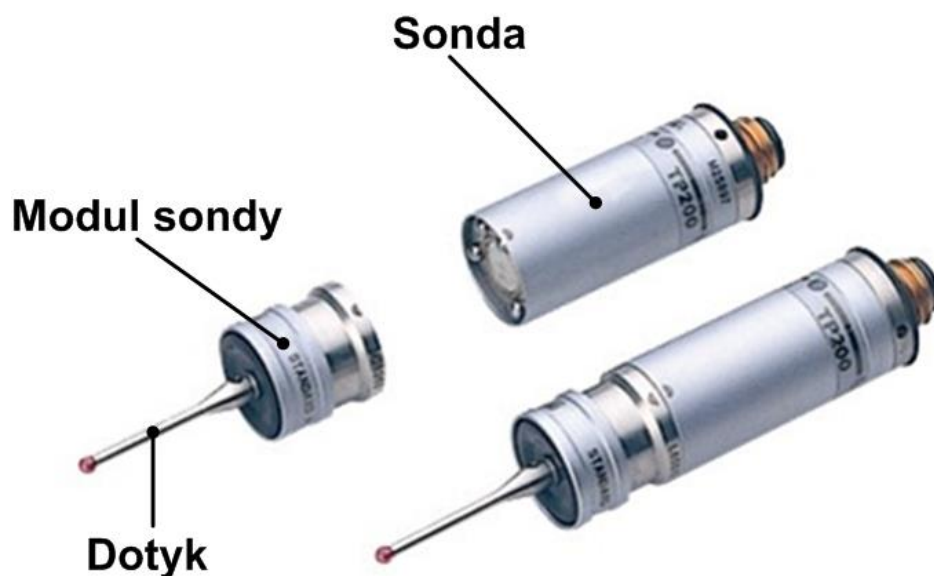
Typické aplikácie:

- získanie kompletnej geometrie meraného predmetu v jednej meracej sekvencii,
- meranie vnútorných geometrií súčiastok v zle prístupných miestach,
- 3D porovnanie nominálnych a aktuálnych údajov napr. 3D zobrazenie odchýlok siete bodov voči 3D CAD modelu,
- reverzné inžinierstvo a iné.

3.2.2 Snímacie dotyky pre SMS

Snímací dotyk chápeme ako neoddeliteľnú súčasť meracieho systému SMS, ktorého úlohou je sprostredkovať kontakt medzi kontrolovanou súčiastkou a modulom sondy (obr.60). Konštrukcia a rozmer použitého dotyku závisí od povahy snímaného povrchu prvku. Z konštrukčného hľadiska rozlišujeme tieto typy snímacích dotykov:

- priame,
- hviezdicové,
- diskové,
- dotyky pre špeciálne účely:
 - ✓ valcový dotyk,
 - ✓ špička,
 - ✓ dutá keramická polguľa,
 - ✓ dotyk na ustavovanie nástrojov. [75]



Obr. 60 Sonda TP200 s modulom a dotykom [41]

Priamy dotyk (obr.61).

Jedná sa o najjednoduchší a najpoužívanejší tvar dotyku pozostávajúceho z presnej guľôčky zvyčajne z priemyslového rubínu a stopky, ktorá môže byť vyrobená z rôznych druhov materiálov. [75]



Obr.61 Priamy dotyk[80]

Hviezdicový dotyk (obr.62).

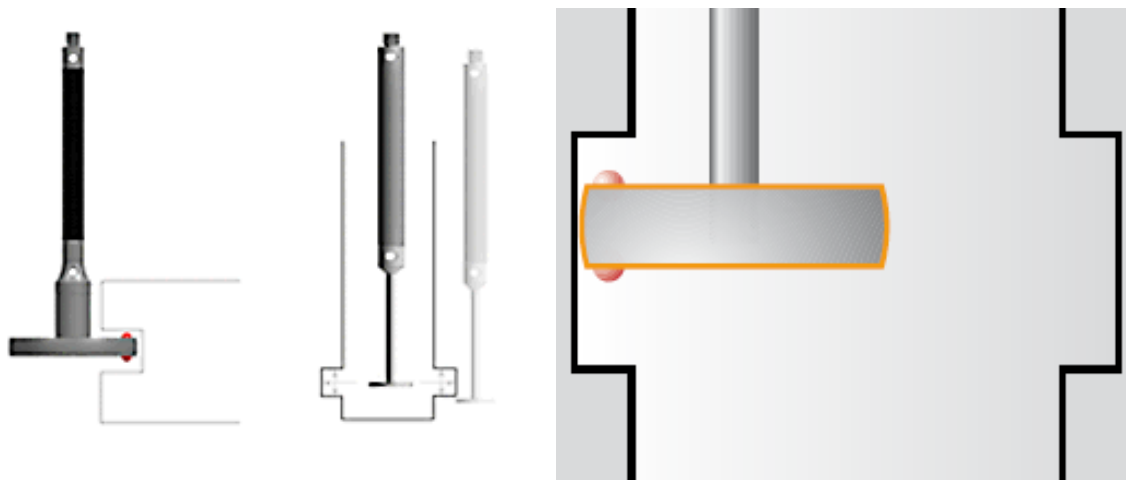
Vďaka väčšiemu počtu hrotov umožňujú tieto konfigurácie dotykov snímanie zložitých prvkov či otvorov. Systémy so štyrmi alebo piatimi guľôčkami sú pevne pripevnené ku strednému dielcu z nerezovej ocele. [75] Každý dotyk sa musí jednotlivo kalibrovať.



Obr.62 Hviezdicový dotyk [70] [76]

Diskový dotyk (obr.63).

Tieto dotyky sa používajú ku kontrole zápchov a drážok v otvoroch, kde sa nedá použiť hviezdicový dotyk. Diskový dotyk je vo skutočnosti tenký plátok veľkej veľmi presnej gule. Dotyky sú k dispozícii v mnohých priemeroch a hrúbkach. Ich charakteristickými vlastnosťami je možnosť rotačného nastavenia okolo osi dotyku a ďalej možnosť kombinácie disku so stredovým dotykom. [75]



Obr.63 Diskový dotyk [84] [85]

Valcový dotyk (obr.64).

Používa sa ku snímaniu rôznych tvarových prvkov (napr. dier) vyrobených z tenkých plechov a závitov. Kalibrujú sa podobne ako priame dotyky.



Obr.64 Valcový dotyk [83] [68]

Dutá keramická polguľa (obr.65).

Tento typ dotyku je určený ku kontrole hlbokých otvorov, a ak si kontrola vyžaduje použitie iba jedného typu dotyku. Vďaka veľkosti svojho zakončenia (tvaru gule) dokáže do určitej miery kompenzovať vplyv vysokej drsnosti povrchu.



Obr.65 Dutá keramická polguľa [72]

Špička (obr.66).

Tento typ dotyku je určený ku kontrole závitov, definovaných bodov (aj ich lokalizáciu) a rysiek.



Obr.66 Diskový dotyk [74][86]

Príslušenstvo k snímacím dotykom

Z dôvodu zaistenia komplexnosti kontroly súčiastok sú snímacie dotyky vybavené najrôznejšími príslušenstvami a to od rôznych predĺžení až po rôzne špeciálne adaptéry.

Predĺženie dotyku (obr.67).

Zaisťuje ďalšiu možnosť preniknutia do dielca prostredníctvom predĺženia dotyku ďalej od sondy. Použitie predĺžovacích nastavcov však môže spôsobiť zníženie tuhosti a tým znížiť presnosť sondy. To však neplatí u tenzometrického merania. Vďaka nízkej spínacej sile sú tieto zariadenia na takýto typ nepresnosti menej citlivé. [75]



Obr.67 Diskový dotyk [77][73]

Kíbový adaptér (obr.68).

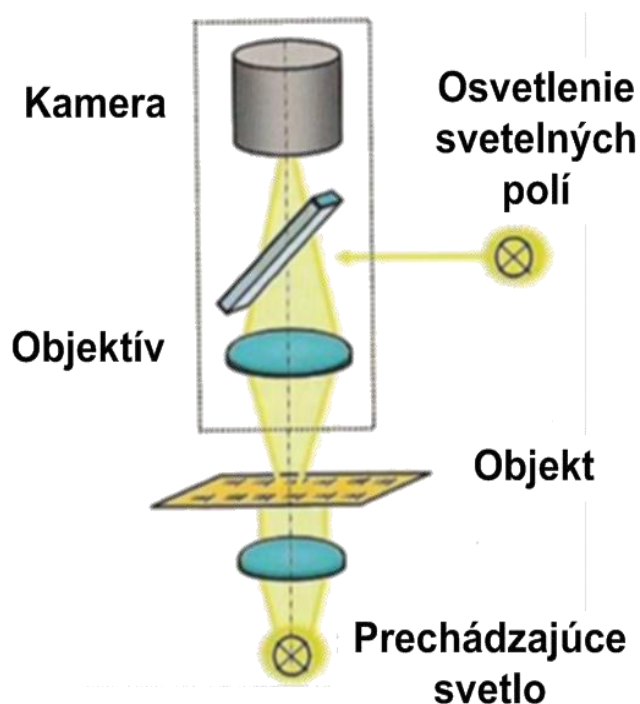
Je určený na nastavenie dotyku v dvoch osiach podľa charakteru meraného prvku. Takéto nastavenie sa používa u pevných meracích hláv.



Obr.68 Kíbový adaptér [69]

3.2.2.1 Senzor spracovania obrazu

Ako vizuálny senzor sa dnes typicky používa senzor spracovania obrazu (obr. 69). Meraný objekt sa cez objektív zobrazí na matricovej kamere. Elektronika kamery prevedie optické signály na digitálny obraz, ktorý sa použije pre výpočet meraných bodov vo vyhodnocovacom počítači s odpovedajúcim softvérom pre spracovanie obrazu. Na výkonnosť takýchto senzorov majú rozhodujúci vplyv rôzne jednotlivé súčiastky, ako je osvetlenie, optika, čip senzora, elektronika a algoritmus pre výpočet. Najlepšie výsledky, pokiaľ ide o neistotu merania, sa dajú dosiahnuť telecentrickými objektívmi. [14]



Obr.69 Senzor spracovania obrazu [14]

3.2.2.2 CCD kamera (Charge Coupled Device)

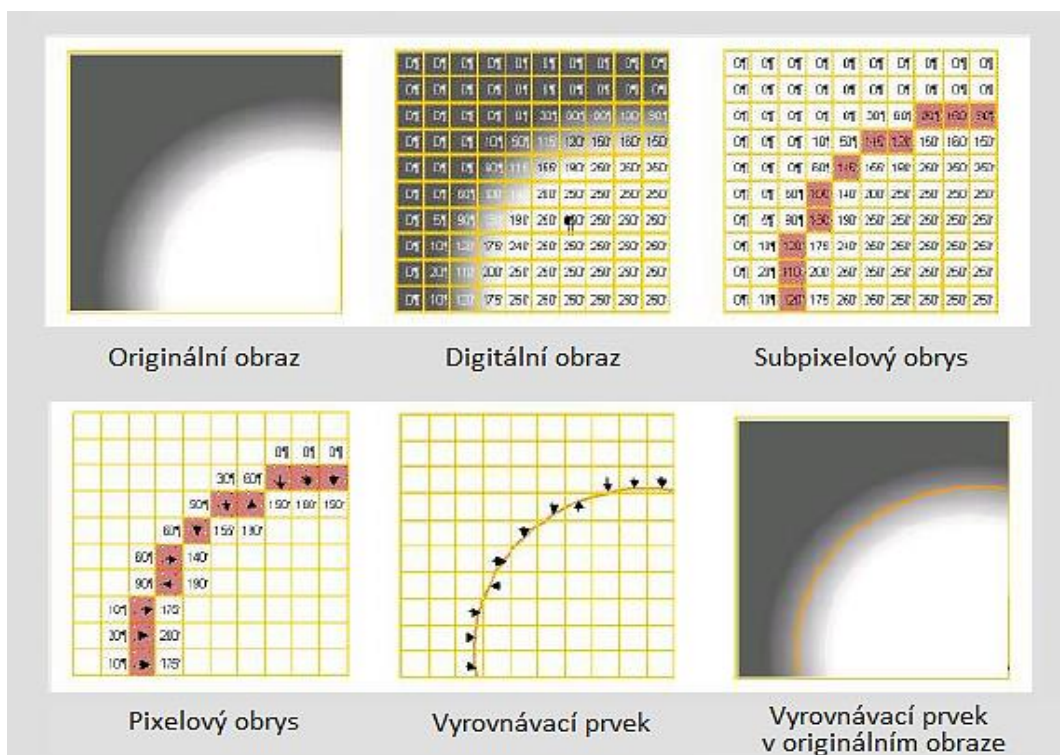
K digitalizácii obrazu sa dnes obvykle používajú CCD kamery (obr.70) spoločne s počítačovými súčiastkami pre zachytenie obrazu.

Výhodou CCD kamery oproti konkurenčnému čipu CMOS je dobrá metrologická kvalita. Obzvlášť lineárny vzťah medzi vstupným signálom a digitálnym výstupným signálom je potrebný pre presné meranie. I softvér, ktorým sa zisťujú merané body z digitalizovaných dát obrazu, ovplyvňuje významne kvalitu výsledkov merania senzorov spracovania obrazu. V zásade sa rozlišujú dve koncepcie softvéru: „Edge Finder“ (vyhľadávač hrán) a spracovanie obrysového obrazu. [14]



Obr.70 CCD kamera [78]

Pomocou Edge Finder sa zisťujú priesečníky priamok vopred definovaných v obraze s viditeľnými obrysmi objektu. Toto sa postupne opakuje na mnohých miestach vo vopred určenej vyhodnocovacej oblasti. Tak vznikne množstvo meraných bodov, ktoré sú oknom zlúčené do skupiny. Pre každé určenie jednotlivého bodu prebehne však samostatné jednorozmerné vyhodnotenie. Rozsiahla dvojrozmerná informácia obsiahnutá v obraze sa tak nezohľadní. Toto vedie obzvlášť pri meraní v dopadajúcom svetle k problémom. Rušivé obrysy spôsobené povrchovými štruktúrami, vylomením a znečistením sa dajú rozoznať a kompenzovať len podmienene. [32]

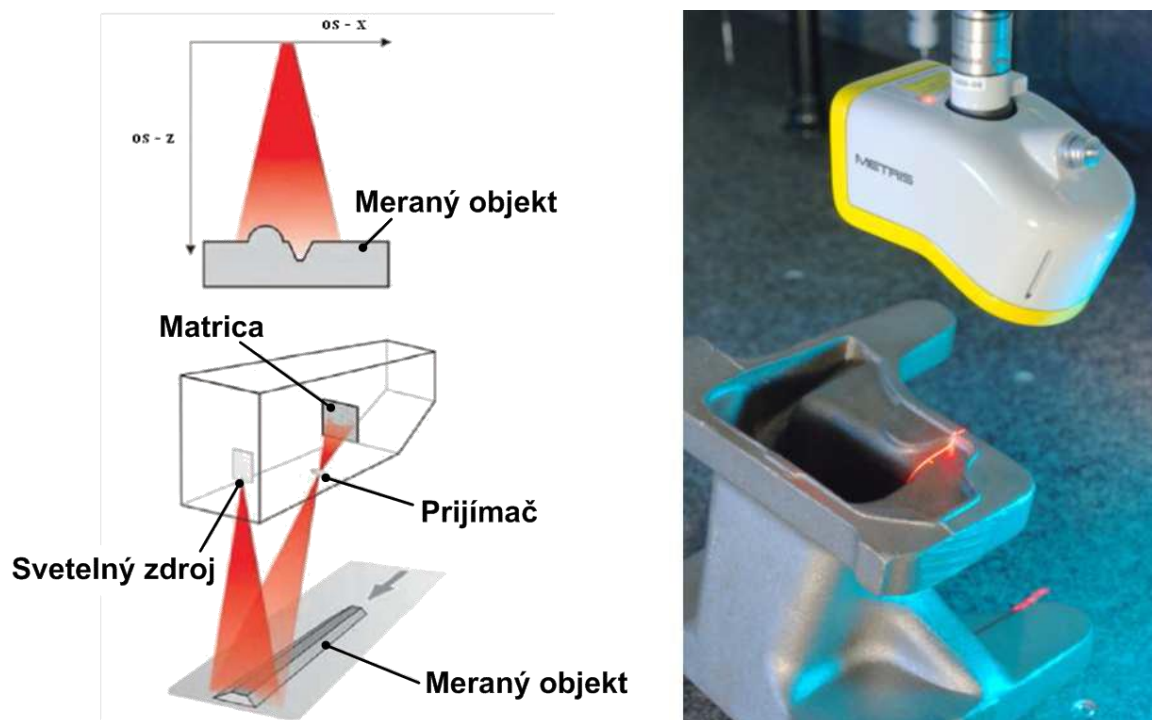


Obr.71 CCD kamera [78]

Pri spracovaní obrysového obrazu sa obraz berie v rámci vyhodnocovacieho okna ako plošný celok (obr.71). V tomto obraze sa vhodnými matematickými algoritmi extrahujú obrysy. Každému obrazovému bodu obrysu sa potom priradí meraný bod. Merané body sa radia za sebou ako na perlovom náhrdelníku. To dáva možnosť zistiť rušivé vplyvy pri meraní a odfiltrovať ich, bez toho že by sa zmenil tvar. Vo vnútri zachytenej oblasti môže byť viac rôznych obrysov. [14]

3.2.2.3 Laserový senzor

Princíp merania laserového bodového senzora (obr.72) spočíva v tom, že sa na meraný objekt premieta svetelný lúč vytvorený laserom (väčšinou laserová dióda). Odrážajúca sa svetelná škvŕna sa zobrazí na optoelektrickom senzore. Vhodným postupom sa odvodí poloha meraného bodu. Väčšina známych metód spadá do oboch kategórií, interferometrická a triangulačná metóda.



Obr.72 Laserový senzor [71]

Triangulačné senzory, často používané v automatizačnej technike, fungujú podľa nasledujúceho princípu. Laserový lúč a os zobrazovacej optiky senzora zvierajú uhol niekoľko desiatok stupňov. Tak sa vytvorí medzi laserovým vysielateľom, meraným bodom a senzorom trojuholník, z ktorého sa dá zistiť hľadaná vzdialenosť pomocou vzťahov medzi uhlami (triangulácia). Výsledok merania do značnej miery závisí na štruktúre a uhle sklonu povrchu.

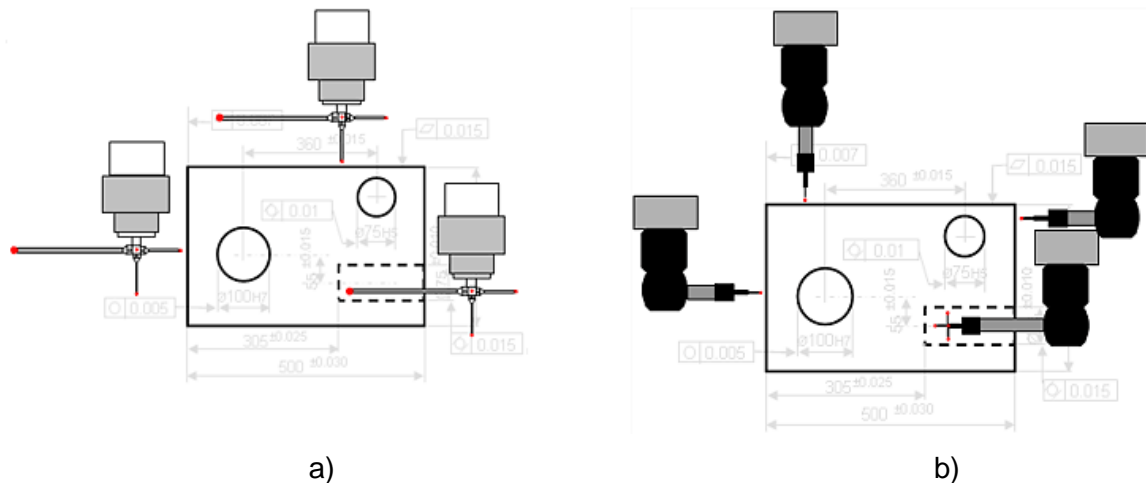
To vedie k pomerne veľkej neistote merania, ktorá dovoľuje použitie tejto metódy len v niekoľkých presných SMS. Lepšie výsledky sa dajú dosiahnuť s laserovými senzormi, ktoré fungujú na Foucaultovom princípe. Využívajú uhol apertúry zobrazovacej optiky senzora ako trigonometrický uhol. Namiesto laserového bodu sa zobrazí na objekte Foucaultovo rozhranie, ktoré sa nachádza v dráhe lúčov. Vyhodnotenie signálu prebehne pomocou diferenčných fotodiód. Odchýlky od nulovej polohy laserového senzora zistené týmto spôsobom sa používajú doregulovaniu v príslušnej ose SMS. Výsledok merania sa získa z prekrytia nameraných hodnôt laserového senzora a SMS. I u tohto typu senzora ovplyvňujú povrchy materiálov a sklon povrchu značne výsledok merania, takže je potrebná korekcia veličín týchto vplyvov. Vhodným softvérom však možno neistotu merania znížiť do takej miery, že spĺňa požiadavky pre vysoko presné SMS. Za sekundu sa dá zmerať niekoľko sto až tisíc bodov. Tieto senzory sa tak hodia i ku skenovaniu povrchových profilov.

U metódy línie laserového lúča sa rozširuje klasická laserová triangulačná metóda na dvojrozmerné meranie tak, že sa laserový lúč uvedie do pohybu pomocou pohyblivého zrkadla integrovaného v hlave senzora. Vyhodnotenie potom prebehne pomocou matricovej kamery tak, že sa získa výsledok merania pre mnoho bodov zistený pomocou triangulácie. Tým sa zmeria línia na povrchu meraného objektu.

Laserovým skenerom sa získa obrovské množstvo bodov, ktoré je potom filtrované na trojuholníkovú sieť, ktorá sa dá použiť napr. pre pevnostné výpočty súčiastky. Skenovanie laserom sa dá využiť pre tzv. reverzné inžinierstvo čo je tvorba 3D modelu a výkresovej dokumentácie zo súčiastky neznámeho tvaru. Ďalšou aplikáciou lasera je komplexné porovnanie naskenovanej súčiastky s jej CAD modelom a meranie poddajných súčiastok, ktoré nemôžu byť merané kontaktnou metódou merania. Nevýhodou lasera je citlivosť na lesklé plochy. V prípade potreby skenovania lesklých povrchov, musia byť tieto povrchy upravené špeciálnym postrekom, v podobe veľmi jemného práškového spreja. [14]

3.2.3 Typy snímacích hláv a ich vplyv na meranie

Snímacia hlava je prvok snímacieho systému, ktorý slúži na polohovanie sondy voči meranému objektu. Môže byť pevná alebo otočná s manuálnym polohovaním, alebo motorizovaná. Na obr.73 je zobrazené použitie otočnej a pevnej snímačej hlavy.



Obr. 73 Meranie súčiastky pomocou a) pevnej snímačej hlavy, b) otočnej snímačej hlavy [35]



Potrebné si zapamätať

Spínacie hlavy rozdeľujeme na pevné a indexovateľné (motorické, ručné)



Výhody

Spínacie hlavy pevné sa vyznačujú vysokou presnosťou merania a nízkou neistotou merania. Môžu pracovať so sondami alebo ich zostavami, ktoré majú vyššiu hmotnosť.

Spínacie hlavy indexovateľné sú flexibilnejšie (jednou meracou sondou dokážeme zmerať tvarovo zložitú súčiastku).



Nevýhody

Spínacie hlavy pevné vyžadujú špeciálne prípravky na nastavenie uhlov meracích sond.

Spínacie hlavy indexovateľné môžu pracovať so sondami nižšej hmotnosti.

Výhoda otočnej hlavy je v tom, že použitím jedného dotyku dokážeme zmerať tvarovo zložitú súčiastku, pri ktorej by sme u merania s pevnou hlavou museli použiť viacero snímacích dotykov.

Otočné snímačie hlavy s manuálnym polohovaním sa používajú pri jednoduchších manuálnych SMS strojoch alebo pri multisenzorovej meracej technike.

2.2.1 Spôsoby merania na súradnicových meracích strojoch

Meranie, ktoré pomocou SMS môžeme realizovať sa vykonáva:

- kontaktne,
- bezkontaktné (optoelektronické meracie systémy).

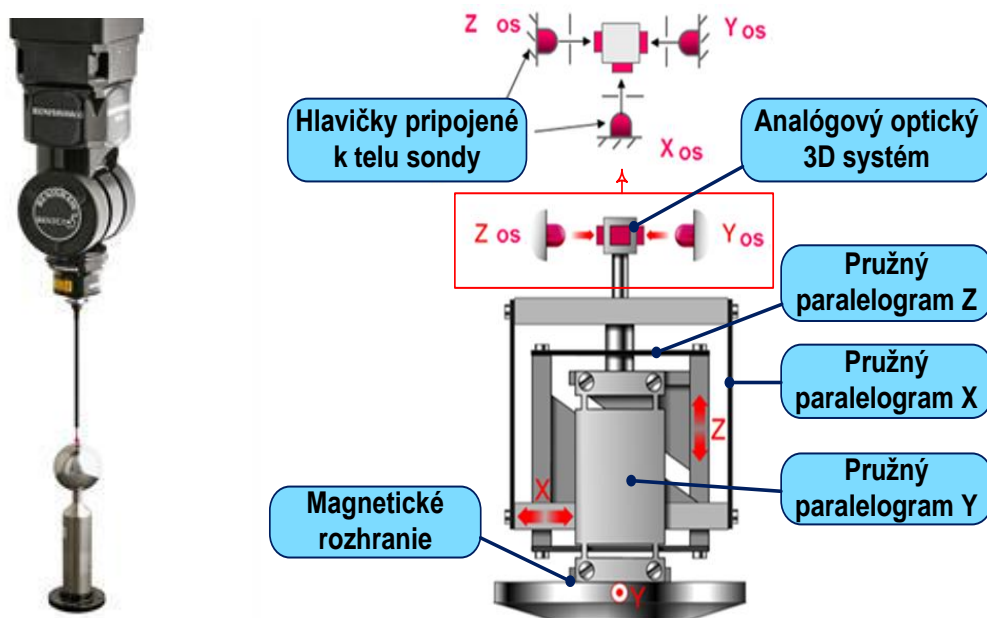
Kontaktné meranie

Meracia hlava sa dotýka meraného objektu prostredníctvom svojho hrotu, ktorý je vybavený rubínovou guľôčkou (jej priemer býva rôzny, ale najčastejšie sa používa priemer 3mm). Meracie hroty sa používajú v dvoch konštrukčných prevedeniach:

- jednoduchom (v tvare zápalky),
- päťramennom dvojitém kríže (tzv. ježko)

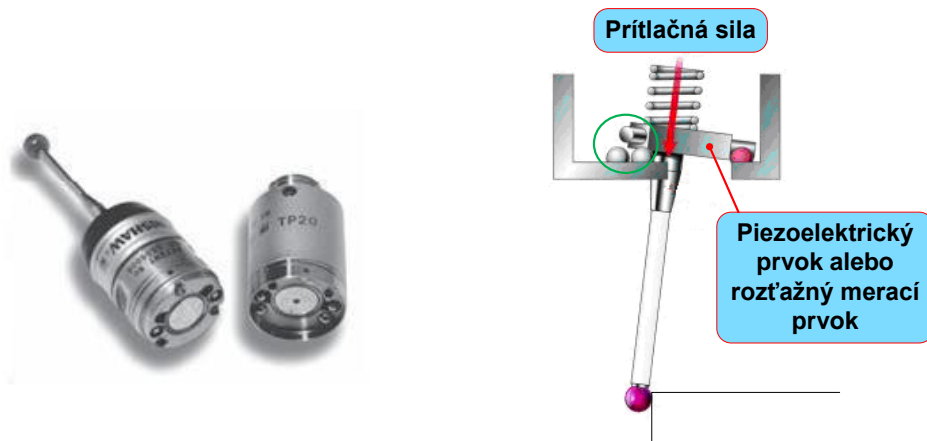
Kontaktné meranie sa môže vykonávať v dvoch režimoch:

- snímacom (obr.74) (zakončenie meracieho hrotu pracuje v režime, pri ktorom je v neustálom kontakte s meraným objektom. Počas procesu merania riadiaci systém v okamihu, keď zaznamená kontakt hrotu s meraným objektom, vypne dotlačanie, ktoré vyvodzuje nastavenú meraciu silu a zapne pohony pre príslušné osi. Týmto spôsobom sa zabezpečí trvalý kontakt hrotu s meraným predmetom).



Obr.74 Kontaktná snímacia sonda [12]

- spínacom (obr.75) (Pri kontakte s meraným predmetom dochádza k vychýleniu meracieho hrotu, čo nasledovne spôsobí zopnutie kontaktov a vyslanie signálu riadiacemu systému).



Obr. 75 Kontaktná spínacia sonda [20]

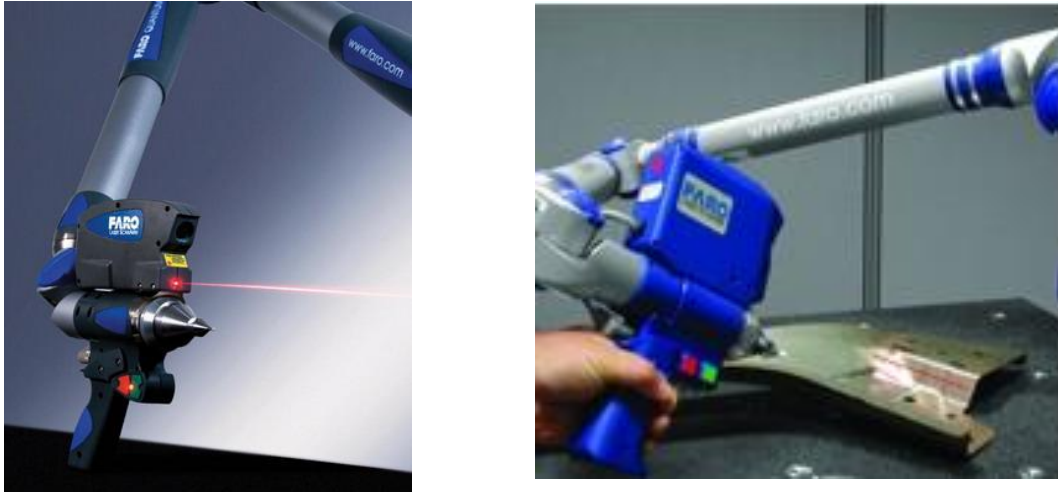
Bezkontaktné meranie

Typickým predstaviteľom takéhoto spôsobu merania sú optické systémy (laserové a kamerové). Pri laserových systémoch sa využívajú dva rovnobežné laserové lúče, ktoré sa pretínajú v presne definovanej vzdialenosti. V mieste, kde sa prienik týchto dvoch lúčov dotkne meraného predmetu, vyhodnocovacia jednotka stroja zaregistruje dotyk. Pri kamerových systémoch sa prostredníctvom elektroniky kamery prenesie optický signál na digitálny obraz, ktorý sa použije k výpočtu meraných bodov vo vyhodnocovacom programe. V súčasnosti sa postupne rozvíja nový spôsob bezkontaktného merania tzv. "počítačová topografia".

3.3 Mobilné meracie systémy

Nutnosť kontrolovať veľké výrobky, napr. karosérie v automobilovom priemysle alebo vykonávať kontrolné operácie v leteckom a v lodnom priemysle, vedie k používaniu mobilných meracích systémov. V posledných rokoch zaznamenali tieto meracie systémy veľký úspech z hľadiska rýchleho merania, dostupnosti, širokej oblasti použitia, presnosti atď. Sú založené na rôznych meracích princípoch a využívajú rôzne meracie metódy. Do tejto skupiny meracích prístrojov patria aj tzv. meracie ramená. Typickým predstaviteľom tejto skupiny sú prístroje od firmy FARO Technologies. K základným vlastnostiam meracieho ramena patrí :

- malá hmotnosť,
- ľahké dosiahnutie meraného bodu aj na zle dostupných miestach kontrolovaného objektu,
- veľká rýchlosť merania,
- možnosť upnutia prístroja na ľubovoľnú plochu napr. priamo na obrábací stroj a iné.



Obr. 76 Meracie rameno FARO s laserovou hlavicou [29] [34]

Podstatou prístroja je meracie rameno, ktoré je zložené zo šiestich alebo siedmich kĺbov, v ktorých sú umiestnené presné uhlové snímače. Dotyková meracia hlava je umiestnená na konci meracieho ramena, ktorá sníma kontrolované body a ich polohu nasledovne vyhodnocuje v reálnom čase. Uvedené zariadenie v súčasnej dobe používa na Žilinskej univerzite v Žiline, Katedra konštruovania a častí strojov. Meracie rameno FARO (obr. 76) meria kontaktne s presnosťou 0,05mm a bezkontaktné (laser) s presnosťou 0,03mm. Na vyhodnotenie merania sa používa program Poly Works.

Iným druhom mobilných meracích systémov sú kamerové systémy. Príkladom takéhoto zariadenia je prenosný elektro-optický súradnicový merací prístroj.

Ak prístroj obsahuje jednu kameru označuje sa SOLO a ak dve označuje sa DUO. U dvojkamerové prevedenia (DUO) sa dosahuje vyššia presnosť.



Porovnanie metódy

Kontaktná metóda merania je vhodnejšia pre súčiastky, kde sa vyžaduje vyššia presnosť kontroly.

Bezkontaktná metóda merania je vhodnejšia pre súčiastky, kde sa vyžaduje nižšia presnosť a kratší čas kontroly.

3.3.1 Programy pre obsluhu a riadenie súradnicových meracích strojov

Metrologické programy pre obsluhu meracích strojov a prístrojov zohrávajú veľmi dôležitú úlohu v procese spracovania a vyhodnotenia nameraných údajov v reálnom čase. Realizované merania sa môžu vzťahovať buď k hodnotám predpísaným klasickým výkresom alebo k modelu, ktorý bol vytvorený a uložený v podobe 3D elektronického súboru.

Pre obsluhu a riadenie merania na 3D SMS sa používajú najrôznejšie programy (každý program je v niečom špecifický). Každý výrobca 3D meracej techniky používa na svojich meracích zariadeniach vlastné programy. K najznámejším programom na Slovensku pre 3D SMS patria:

- CALYPSO, Holos (firma ZEISS),
- INCA 3D (firma MORA),
- METROSOFT CM (firma WENZEL),
- PC-DMIS (firma DEA),
- WinWerth (firma WERTH Messtechnik GmbH),
- JoWin (firma JOHANSSON),
- Metrolog XG (firma THOME PRÄZISION),
- LK Camio Studio Inspect (firma METRIS),
- MCOSMOS (firma MITTUTOYO),
- MeasureMax+ (firma SHEFFIELD) a iné.

Súčasný stav v strojárskkej praxi vyžaduje, aby SMS komunikoval so svojim okolím. Komunikácia sa uskutočňuje na základe výmenných formátov (napr. CATIA-V5; UNIGRAPHICS; PARASOLID; PRO/ENGINEER; VDA; IGES; STEP a iné). Najbežnejšie požiadavky na merací softvér sú napr.:

- možnosť automatického načítania výsledkov merania do SPC aplikácií,
- možnosť exportu údajov do tabuliek MS Excel,
- použiteľnosť pre rôzne operačné systémy napr. Linux, Windows,
- možnosť importu údajov pre meranie podľa CAD modelu,
- potreba skenovania 2D a 3D všeobecných plôch a profilov,
- následná možnosť exportu nameraných údajov pre potreby reverzného inžinierstva a iné.

V súčasnej dobe na Žilinskej univerzite v Žiline, Katedre konštruovania a častí strojov a Katedre obrábania a výrobnjej techniky sa používajú tieto meracie stroje: 3D SMS MORA MS 10 (program Inca 3D), Werth Video Check® IP (program WinWerth), Faro (program Polyworks).

3.3.2 Kontrola v pracovnom priestore obrábacieho centra

Takáto metóda merania sa môže realizovať pre kontrolu rozmerov polotovarov, obrobkov alebo nástrojov v automatickom cykle priamo v pracovnom priestore obrábacieho centra. Vykonávané meranie je súčasťou programu obrábania a obsahuje príkazy pre meracie cykly, uloženie prípadných korekcií do pamäti a ich automatickú realizáciu pri nasledujúcom obrábaní.

3.3.2.1 Systémy pre kontrolu nástrojov

Rýchle a spoľahlivé zisťovanie poškodenia nástroja na obrábacích centrách je veľmi dôležité hlavne pri automatických obrábacích cykloch. Poškodené nástroje môžu spôsobiť vznik chybných výrobkov, drahé nákladné opravy a plytvanie časom.

Vo výrobnom procese rozlišujeme systém kontroly nástrojov na:

- kontaktný,
- bezkontaktný (optický).

Kontaktný systém detekcie nástroja

Nástroj sa pri kontrole dostane do kontaktu s meracou sondou. Sonda vygeneruje spínací signál a zaznamená, že nástroj je nasadený správne a nie je poškodený.

Bezkontaktný systém detekcie nástroja

Konvenčné kontrolné systémy detekcie poškodenia nástroja sú pre malé nástroje mnohokrát nepoužiteľné. Laserové systémy umožňujú bezkontaktnú detekciu poškodenia nástroja a zvyšujú mieru bezpečného merania malých nástrojov.

Uvedený systém môže byť umiestnený na stole stroja alebo po jeho stranách, takže lúč prechádza pracovným priestorom. Prechod nástroja lúčom vyvolá pokles intenzity svetla v prijímači, tým sa generuje spínací signál. Ak nedôjde k poklesu intenzity svetla v prijímači, predpokladá sa, že nástroj nenarušil lúč tak, ako sa predpokladalo, a preto je nástroj poškodený.

3.3.2.2 Meracie sondy

V dnešnej dobe sa neoddeliteľnou súčasťou moderných obrábacích centier stali kontrolné meracie jednotky. Ich účelom je kontrola pracovných nástrojov a vopred vybraných obrobkových plôch. Základným elementom tohto kontrolného systému je meracia sonda.

Sondáž nástrojov a obrobkov môže fungovať na sebe nezávisle alebo spolupracovať dohromady. Každá sonda obsahuje svoj vlastný software a hardware. Môžeme ich rozdeliť podľa použitia na [13]:

- nástrojové sondy:
 - dotykové sondy,
 - optické sondy,

- obrobkové sondy:
 - dotykové sondy,
 - optické sondy.

Nástrojové sondy

Nástrojové sondy (obr. 77-78) sa používajú na nastavenie nástrojov a ich kontrolu (detekcia poškodenia nástroja napr. jeho zlomenie) v stroji.

Bezdotykové meranie (laserové) umožňuje robiť na rezných nástrojoch veľmi rýchle meranie a ich kontrolu. Systém je založený na laserovom lúči a fotodióde. Merania sa uskutočňujú na základe prerušovania laserového lúča nástrojom. Na rozdiel od kontaktných nástrojových sond umožňujú merať otáčajúce sa nástroje (a to i pri vysokých otáčkach). Tým sa výrazne skraca kontrola rezného nástroja.



Obr. 77 Kontaktná nástrojová sonda TC76 [9] Obr.78 Bezkontaktná nástrojová sonda [44]

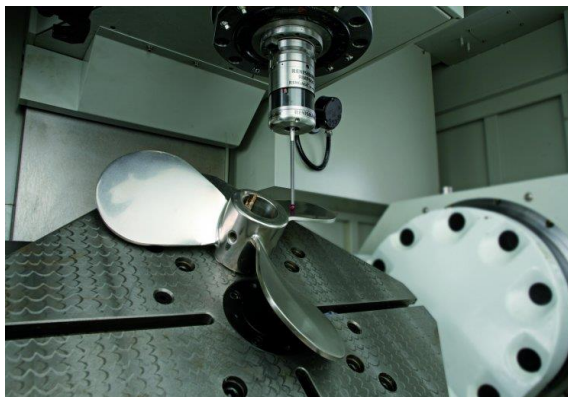
Obrobkové sondy

Obrobková sonda (obr. 79-80) je v systéme stroja zavedená ako ďalší nástroj. Cyklus merania sa môžeme realizovať kedykoľvek v procese obrábania. Používa sa na ustavenie a rozmerovú kontrolu obrobku. Prenos nameraných údajov sa uskutočňuje prostredníctvom dátového kábla alebo bezdrôtovou komunikáciou (opticky). Moderné sondy používajú druhú možnosť. Bezdrôtová komunikácia sondy pracuje na základe prenosu optických signálov (infračervený signál), ktoré sú spracované v prijímači. Uvedené zariadenie musí byť umiestnené v dosahu sondy (t.j. v stroji), aby mohlo zachytiť bezdrôtový (optický) signál sondy. Meracie sondy môžu byť vybavené meracími hrotmi rôznych tvarov. Snímače umožňujú pohyb hrotu v 2 alebo 3 smeroch [2].

Meracia hlava (pre nástrojové alebo obrobkové sondy) je pripojená (káblom alebo opticky) k jednotke komunikačného rozhrania (spracováva signál vytvorený meracou hlavou), ktorá je prepojená s CNC riadením stroja.



Obr. 79 Kontaktná obrobková sonda TC53-10 [38]



Obr. 80 Kontaktná obrobková Sonda RMP600 [43]

3.4 Počítačová simulácia kontroly výrobkov

Simulácia umožňuje vopred si "prehrať" správanie sa systému po realizácii opatrení, pozrieť sa do budúcnosti a tak v predstihu "vychytať" prípadné problémy. Počítačová simulácia merania predstavuje vlastne "skúšobný matematický model" v počítači, ktorý pomáha napríklad overovať vhodnosť a efektivitu rôznych stratégií merania.

3.4.1 Programovanie merania u súradnicových meracích strojov

Súčasný CNC meracie stroje sa dajú programovať offline alebo priamo pri stroji zatiaľ čo pracuje iná časť programu.

Meracie programy pre SMS stroje obsahujú veľké množstvo modulov, pričom najjednoduchšie sú určené na manuálne meranie objektu. Priebeh merania je zapisovaný do stromového okna programu. Tento priebeh môže byť uložený a znovu použitý pri ďalšom meraní tej istej meranej súčiastky. Takýto druh merania sa nazýva tzv. „**teach in**“ režim a je to najčastejšie používaný spôsob automatizácie merania. Je využívaná hlavne jeho jednoduchosť a malé nároky na kvalifikáciu meracej obsluhy.

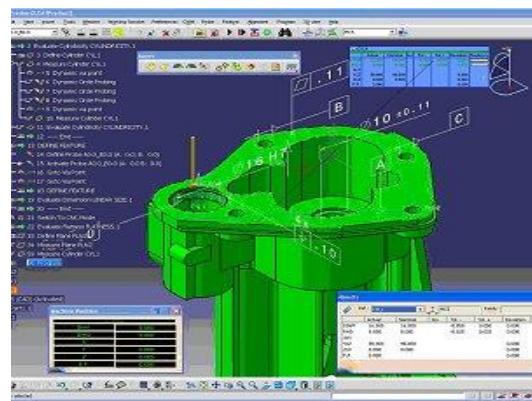
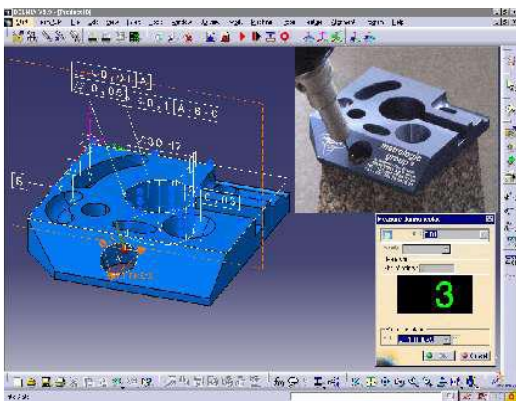
Ďalší režim je offline programovanie. Realizuje sa na počítači alebo pracovnej stanici nezávislej od SMS stroja. Takéto programovanie môže byť integrovanou funkciou v CAD/CAM systéme alebo samostatným systémom využívajúcim geometrické údaje prenesené z CAD systému. Konvenčné systémy sú často kombináciou CAD systému a nezávislého kontrolného programu (týmto sa odstráni problémom vzájomnej súčinnosti medzi CAD systémom a offline programovaním). Medzi takéto programy môžeme napr. zaradiť:

- **Metrolog V5 R16-** e úplne integrovaný do CATIA V5. To mu dovoľuje priamy prístup do databázy geometrie a FTA modulov CATIA V5 [16]. S Metrologom V5 môžeme riadiť SMS, využíva DIMS a analyzuje výsledky priamo porovnávaním súčiastky

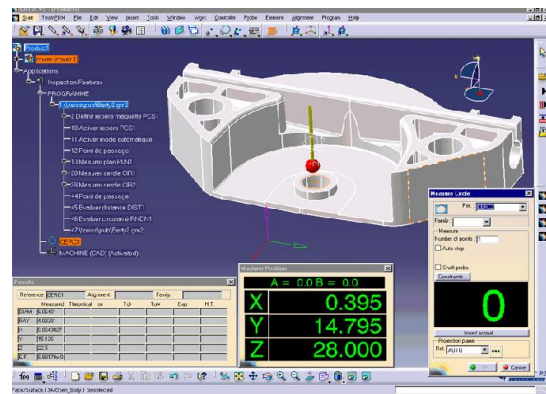
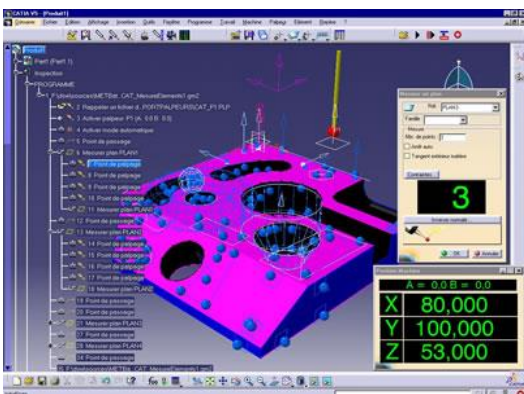
s CATIA V5 dátami v reálnom čase. Uvedený program umožňuje priame prepojenie medzi dizajnom a kontrolou kvality (obr.81-82).

Vlastnosti Metrolog V5:

- je úplne integrovaný vo vnútri CATIA V5 (V5 grafické užívateľské rozhranie),
- priamy prístup do databázy geometrie CATIA V5,
- riadi rôzne typy SMS,
- výstup do programov: Metrolog II, DMIS, Inspect V5.



Obr. 81 Kontrola jednotlivých rozmerov súčiastok [42]



Obr. 82 Metrolog V5 R16 – praktické aplikácie [5]

• Delmia V5 INSPECT

Zaraďuje sa medzi interaktívne 3D grafické stimulačné nástroje, ktoré sú určené pre dizajn, vyhodnotenie a analýzu merania. Obsahuje knižnicu súradnicových meracích strojov. S uvedeným modulom sa dajú vykonávať nasledovné činnosti:

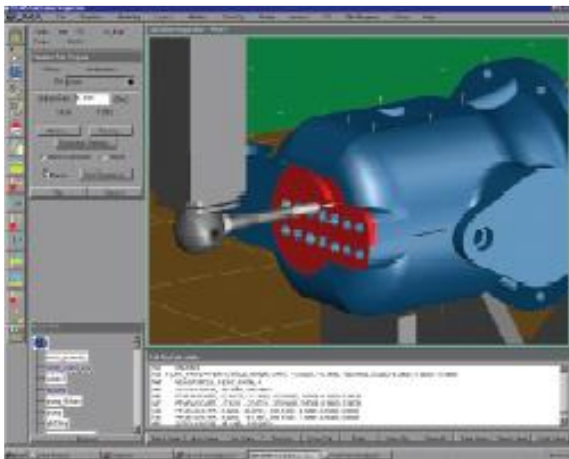
- automatizuje tvorbu súradnicového meracieho stroja,
- stimulačné overenie trasy meracej sondy a to skôr, ako sa naprogramovaná operácia vykoná na SMS,
- v priebehu simulácie môžeme zistiť stav kolízie, merať rozmery CAD modelov a iné.

Vlastnosti Delmie V5 Inspect :

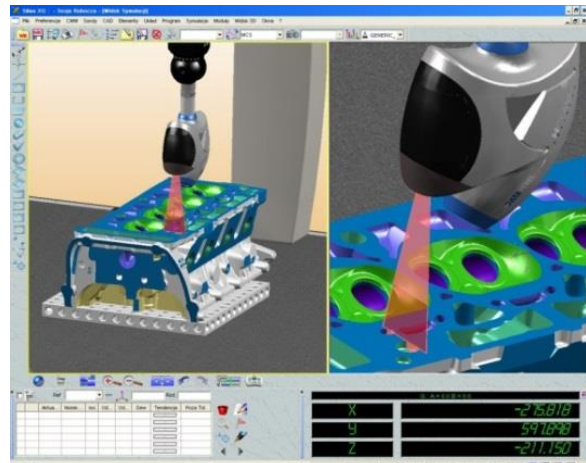
- využíva prístup k rôznym dátam v CATIA,
- využíva znalosti Expert modulu (obsahuje: geometrické rozmery a tolerancie),
- knižnice s komerčnými SMS a iné.

- **SILMA CimStation Inspection**

Je 3D grafický stimulačný program, ktorý umožňuje tvoriť SMS programy priamo z CAD modelu. Obsahuje knižnicu kinematických SMS modelov a snímačov. Uvedený program má priame prepojenia s CATIA, Pro/ENGINEER a následne umožňuje off-line, a on-line programovanie SMS (obr.83-84). CAD modely súčiastok sú importované do CimStation Inspection v ich vlastnom formáte, cez priamu geometriu prepojenia je chránená integrita dát.



Obr. 83 Silma- Zisťovanie kolíznych stavov [22]



Obr. 84 SILMA CimStation Inspection [23]

Medzi vlastnosti uvedeného programu môžeme zaradiť:

- 3D vizualizácia SMS,
- knižnice s komerčnými SMS,
- automatické zistenie kolíznych stavov pri vykonávaní merania a iné.

3.4.2 Štandardy programovania u meracích strojov s využitím CAD systémov

Prechod z CAD geometrie na offline programovacie systémy sa zvyčajne deje klasickými CAD štandardnými výmennými formátmi ako sú IGES a VDA. Najväčším nedostatkom týchto hlavných štandardov je, že neobsahujú odchýlky, ktoré sú dôležitým parametrom pre

hodnotenie kontroly meranej súčiastky, ako aj pre automatizáciu mnohých úloh kontrolného plánovania.

SMS stroje majú zvyčajne svoj vlastný programovací jazyk, ktorý sa musí podriadiť offline programovaniu.

DMIS (Dimensional Measuring Interface Specification) je štandardný formát používaný na obojsmernú komunikáciu medzi CAD systémami a SMS strojmi. DMIS je aj veľmi dôležitý programovací jazyk so skladbou podobnou automaticky programovanému nástroju APT (Automatically Programed Tool). Získané výsledky kontroly sú zvyčajne spracované do formátu použiteľného SMS alebo CAD systémami.



Potrebné si zapamätať

CAD model sa používa na tvorbu meracieho plánu. Pri tvorbe programu sa vychádza zo súradnicového systému súčiastky.

3.4.3 Výhody offline programovania

Offline programovanie ponúka mnohé výhody, ako napr.:

- eliminácia neproduktívneho programovacieho času SMS stroja a potenciálny nárast využitia meracieho stroja,
- vyhnutie sa nečakaným operačným problémom a tým odstránenie neproduktívneho času stráveného preprogramovaním SMS,
- možnosť minimalizácie času nevyhnutného na kontrolu prvku a tým zvýšenie produkcie SMS,
- zníženie prácnosti kontrolných sekvencií a tým umožnenie lepšieho využitia pracovného času kontrolného personálu.

3.5 Presnosť merania u súradnicových meracích strojov

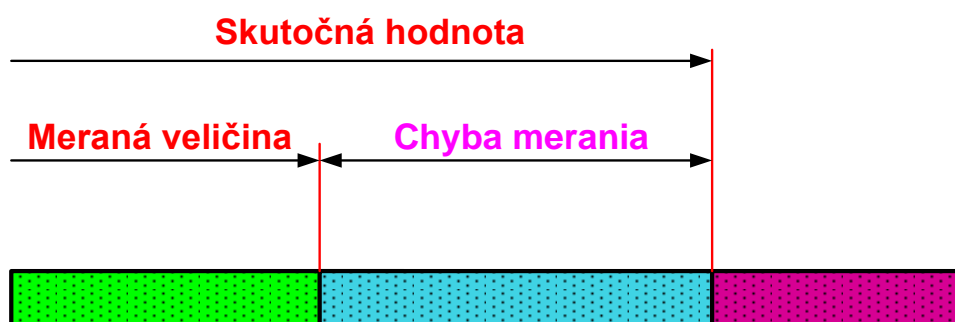
Pod pojmom presnosť merania sa vo všeobecnosti rozumie všetko, čo charakterizuje presnosť výsledku merania. Podobne ako sa nedá vyrobiť súčiastka s ideálnym tvarom a rozmerom, tak aj pri meraní sa už vopred počíta s určitou vstupnou chybou. Presnosť merania SMS závisí hlavne od:

- mechaniky stroja,
- meracieho systému (delenie, ustálenie), chyby v delení sa korigujú pomocou korekčných tabuliek,
- snímacieho systému,

- dotyku,
- elektroniky (interpolácia, digitalizácia),
- počítača,
- vlastnosti meraného objektu,
- prostredie v ktorom sa meranie realizuje.

3.5.1 Chyby merania

Každý merací proces je zaťažovaný určitými chybami. Pretože potrebujeme vedieť, do akej miery sú naše merania reálne, musíme hľadať spôsob, ako aspoň odhadnúť alebo aspoň sčasti opraviť chybu, ktorej sa pri meraní dopúšťame. Pojem chyba merania (obr.85) označuje rozdiel medzi nameranou hodnotou a skutočnou takzvanou konvenčne pravou hodnotou meranej veličiny.



Obr. 85 Neistota merania, chyba merania [31]

Vrátane týchto uvedených druhov chýb sa vyskytujú ešte hrubé chyby, ktorých by sme sa mali vyvarovať. Ak sú týmito chybami zaťažené namerané hodnoty, z ďalšieho procesu spracovania sa ich snažíme vylúčiť. Systematické ako aj náhodné chyby sa nedajú úplne odstrániť, ale často sa ich vplyv na výsledok merania dá znížiť.

Náhodné chyby

Sú chyby, ktoré pri vykonaní veľkého množstva meraní tej istej veličiny za identických podmienok menia nepredvídateľným spôsobom svoju veľkosť a orientáciu. Vytvárajú charakteristický rozptyl výsledkov akejkoľvek meracej metódy a nedajú sa odstrániť korekciami. Ich vplyv sa dá ťažko eliminovať, ale opakovaným meraním možno ich veľkosť znížiť. Náhodné chyby sú charakterizované [52]:

- smerodajnou odchýlkou,
- a typom rozloženia.

Systematické chyby

Sú chyby, ktorých hodnota sa pri rovnakých podmienkach nemení, je konštantná čo do veľkosti aj znamienka, alebo ktorá sa pri zmene podmienok mení podľa určitej závislosti.

Spôsobujú charakteristické vychýlenie výsledkov merania, ktorého vplyv sa dá eliminovať prostredníctvom korekcií. Systematické chyby sú charakterizované na základe opakovaných meraní. Ich vplyv sa snažíme znížiť alebo odstrániť a to [20]:

- vhodnou kompenzáciou,
- uplatnením príslušných korekcií,
- odstránením príčin, ktoré ich vyvolali,
- kombináciou týchto spôsobov.

Zdrojom systematických chýb môžu byť rozličné faktory ako napr.:

- zmena teploty pri meraní,
- blokovanie funkčných častí meradla,
- zmeny v meracej metóde a iné.

Neistota merania

Slovné spojenie neistota merania znamená pochybnosti o platnosti výsledku merania. Uvedený parameter je charakterizovaný na základe rozptylu hodnôt, ktoré môžeme racionálne priradiť k meranej veličine (tolerančné pásmo). Pri jeho určovaní predpokladáme, že namerané hodnoty, ako i chyby merania, majú určité rozdelenie pravdepodobnosti (podliehajú určitému zákonu rozdelenia pravdepodobnosti) [87]. Jeho základnou kvantitatívnou charakteristikou je štandardná neistota, ktorá sa rovná smerodajnej odchýlke príslušného rozdelenia. Štandardná neistota výsledku merania pozostáva z týchto čiastočných zložiek:

Štandardná neistota typu A

Je metóda, ktorá sa vyhodnocuje na základe štatistickej analýzy nameraných údajov, pričom štatistické vyhodnotenie je závislé od modelu merania. Namerané údaje sú získané nezávislými meraniami za rovnakých podmienok. Tento typ neistoty je spôsobený kolísaním nameraných údajov.

Štandardná neistota typu B

Najčastejšie sa viaže na známe, identifikovateľné a kvantifikované zdroje. Takýmito zdrojmi môžu byť napríklad:

- údaje získané pri kalibrácii,
- údaje výrobcu meracej techniky,
- vlastnosti meracej techniky,
- neistoty referenčných údajov v odborných príručkách, atď.

Kombinovaná a rozšířená neistota

Kombinovaná štandardná neistota sa získa zlúčením neistoty typu A s výslednou neistotou typu B. Výsledná kombinovaná neistota veličiny y sa označuje u_{Cy}

$$u_{Cy} = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2} \quad (6)$$

kde u_{Ay} štandardná neistota typu A,

u_{By} štandardná neistota typu B.

Pravdepodobnosť, že skutočná hodnota sa nachádza v intervale určeného štandardnou neistotou je nízka (68% pre normálne rozdelenie, 58% pre rovnomerné rozdelenie) [15]. Z nasledovného dôvodu sa zavádza rozšírená neistota príslušného odhadu.

$$U = k_r \cdot u \quad (7)$$

kde U je rozšírená neistota,

k_r koeficient rozšírenia ,

u štandardná neistota (u_{Cy} , u_{Ay} , u_{By}).

Používané hodnoty k_r sa pohybujú od 2 do 3, vo väčšine prípadov sa odporúča voliť $k_r = 2$. Tento interval pokrýva hodnotu pre normálne rozdelenie s pravdepodobnosťou približne 95 %.

Kovariancia

Ak medzi dvoma výstupnými veličinami napríklad X_i a X_j existuje nejaký spôsob závislosti jednej od druhej, ich kovariancia (miera vzájomnej väzby) sa považuje tiež za zložku neistoty [40]. Táto zložka môže zväčšiť alebo zmenšiť výslednú neistotu merania.

Zdroje neistôt

Všetky vplyvy, ktoré nejakým spôsobom ovplyvňujú neurčitosť merania, spôsobujú vzdialovanie výsledku od skutočnej hodnoty. Niektoré sa však prejavujú len u neistôt typu A alebo B, niektoré ovplyvňujú obe. Určenie neistôt typu B a koeficientov jednotlivých zdrojov neistôt je závislé na zručnosti a skúsenostiach obsluhy.

Zdroje:

- nepresnosť etalónov a referenčných materiálov,
- nevhodný postup pri meraní,
- nevhodný výber prístroja,
- neznáme alebo nekompenzované vplyvy prostredia,

- subjektívne vplyvy obsluhy,
- zjednodušenie, zaokrúhľovanie konštant a prebraných hodnôt,
- linearizácia, aproximácia, interpolácia alebo extrapolácia pri vyhodnotení a iné.



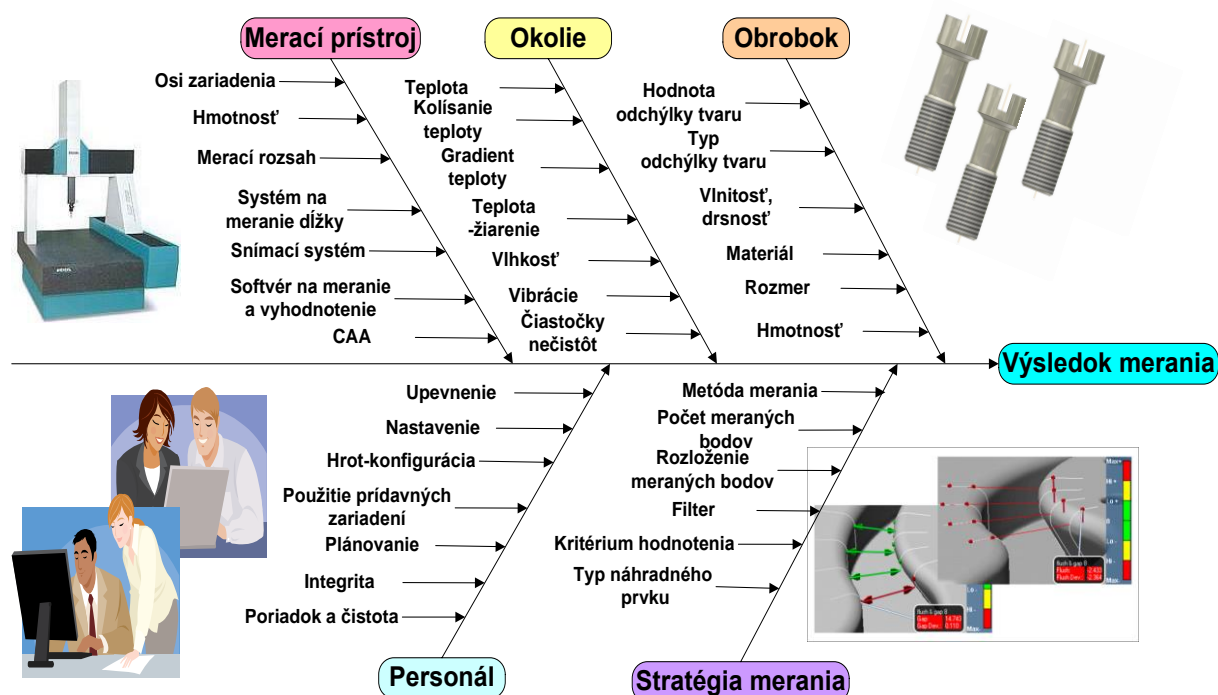
Potrebné si zapamätať

Najčastejším zdrojom neistoty je nedodržanie predpísanej teploty meracieho prostredia.

3.5.2 Vplyvy chýb na výsledok merania

Ovplyvňujúce faktory, ktoré prispievajú k neistote merania a ich jednotlivé zložky môžeme rozdeliť do nasledujúcich skupín:

- objekt merania (výrobok),
- merací prístroj,
- personál (obsluha meracieho stroja),
- stratégia merania a okolie.



Obr. 86 Faktory ovplyvňujúce výsledok merania [18]

Tieto skupiny (obr.86) spôsobujú rôznu stupeň odchýlky výsledku merania od skutočnej hodnoty. Vplyv meraného predmetu sa nedá zovšeobecniť, pretože do značnej miery závisí od spôsobu obrábania i do určitej miery od okolia.

Vplyv od meracieho prístroja

- každé meracie zariadenie obsahuje svoje vlastné vnútorné nedokonalosti, ktoré sa berú do úvahy pri udávaní presnosti konkrétneho meracieho zariadenia, ako sú:

- nepresnosť výroby jednotlivých funkčných elementov,
- nepresnosť montáže prevodových systémov a mechanizmov,
- deformácia.

Tieto negatívne vplyvy sa eliminujú overovaním a kalibráciou meracích zariadení.

Vplyv od okolia

- výrazný vplyv na merané rozmery má teplota. Preto sa väčšina metrologických laboratórií snaží dôsledne udržiavať teplotu na všeobecnej štandardnej teplote ($20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$). Ak sú tepelné vplyvy neznáme, vyčíslenie výsledku merania je veľmi náročné.

Vplyv od objektu merania

- na výsledok merania vplývajú aj niektoré charakteristiky meraného obrobku, medzi ktoré môžeme zaradiť :
 - charakteristiky povrchu,
 - tvrdosť,
 - elastickú a plastickú pružnosť.

Vplyv od obsluhy a stratégie merania

- obsluha meracieho zariadenia by mala používať korektnú stratégiu merania, pretože veľkosť neistoty závisí aj od zvolenej stratégie merania. Niektoré stratégie merania zvyšujú neistotu a iné ju znižujú.

3.5.2.1 Chyby snímania u súradnicového meracieho stroja

Výsledkom výroby nie sú výrobky dokonalé, ale výrobky, ktoré vykazujú chyby, teda rozdiel od menovitého rozmeru. Tieto rozdiely sú stanovené na základe overovania rozmerových a geometrických špecifikácií. V súlade s normou STN EN ISO 10 360 má každá špecifikácia presnosti označenie MPE (Maximum Permissible Error). [30] Meracia úloha je charakterizovaná indexom (napr. MPE_P - označuje najväčšiu dovolenú chybu snímania).

Najväčšia dovolená chyba SMS pri meraní rozmeru (MPE_E)

K stanoveniu odchýlky merania dĺžkových rozmerov je nutné merať kalibrované konečné rozmery alebo stupňové konečné rozmery. Každá dĺžka sa meria najmenej trikrát.

Takýmto spôsobom získané hodnoty sa porovnávajú s kalibračnými hodnotami, pričom odchýlka nesmie prekročiť špecifikáciu. Špecifikácia v závislosti od dĺžky sa uvádza v tvare

$$MPE_E = \pm \text{minimum} (A + L/K) \quad (8)$$

kde A je kladná konštanta v mikrometroch udávaná výrobcom,

K je bezrozmerná kladná konštanta udávaná výrobcom,

L je meraný rozmer v milimetroch.

Najväčšia dovolená chyba snímania (MPE_P)

K stanoveniu kontaktnej odchýlky sa meria kalibračná guľôčka s priemerom 10 až 50 mm na 25 miestach odporučených normou STN EN ISO 10360-2. [30] Z nameraných hodnôt sa vypočíta Gaussova vyrovnávacia guľôčka. Rozsah radiálnych odchýlok od kalibračnej guľôčky nesmie prekročiť špecifikáciu.

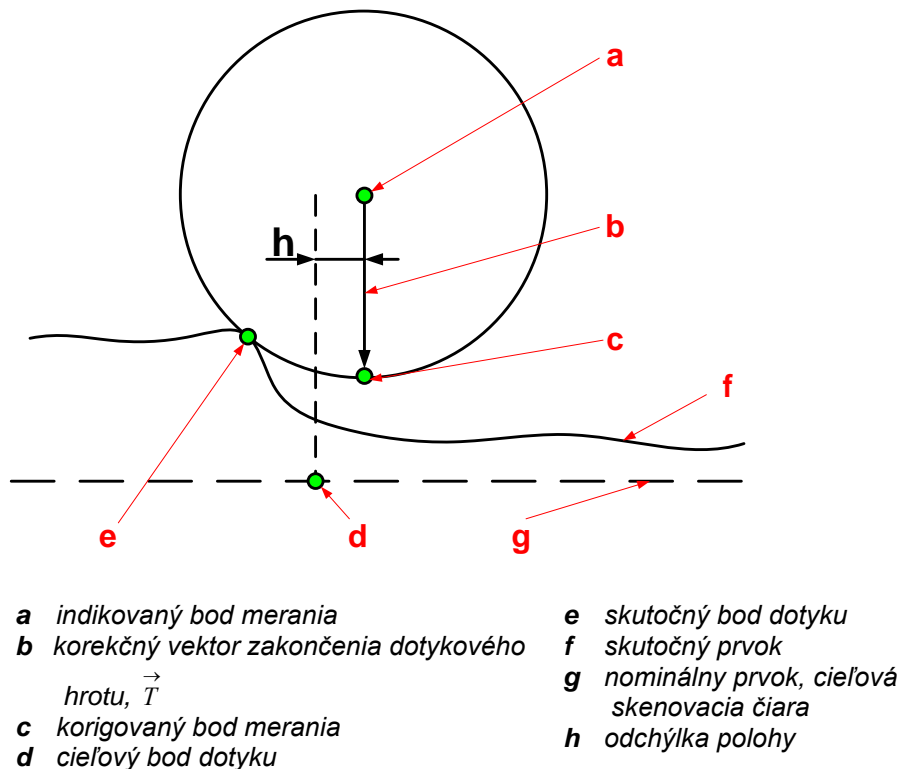
Najväčšia dovolená chyba kontaktného snímania (MPE_{THP})

K stanoveniu kontaktnej odchýlky sa nasníma kalibračná guľôčka s priemerom 25 mm na 4 dráhach stanovených normou STN EN ISO 10360-4 [64]. Pri porovnaní nameraných hodnôt so špecifikáciou MPE_{THP} musí byť splnená podmienka: Rozsah radiálnych odchýlok od kalibračnej guľôčky nesmie prekročiť špecifikáciu, ktorá zodpovedá MPE_P . Navyše, je potrebné uviesť čas T potrebný na vykonanie kontroly, pretože rýchlosť merania má tiež výrazný vplyv na výsledok merania.

3.5.3 Druhy kontaktných bodov

Pri meraní dotyková sonda pôsobí na meraný objekt určitou prítlačnou (mechanickou) silou. To môže spôsobiť posunutie meranej súčiastky na pracovnej doske meracieho stroja a pritom dochádza k vzniku neistoty merania. Z nasledovného dôvodu je nestabilné objekty nutné upnúť. Taktiež treba uvažovať aj nad rýchlosťou snímania bodov.

Voľba vhodnej stratégie merania (spôsob snímania bodov) závisí hlavne od tvaru meranej súčiastky a požadovanej presnosti merania. Dôležité je najmä rozloženie a počet meraných bodov. Výhodnejšie je snímať body čo najviac od seba. Čím vyšší počet bodov zosnímame, tým je meranie presnejšie. Z hľadiska presnosti merania je veľmi dôležité vedieť, aký bod sme zosnímali z meraného objektu. Jednotlivé druhy kontaktných bodov tiež prispievajú k vzniku neistote merania. V súlade s normou STN EN ISO 10 360 v 1. časti rozoznávame tieto body kontaktného merania (obr.87) [79]:



Obr. 87 Názvy bodov [64]

indikovaný bod - je určený bod snímacieho systému, ktorého súradnice sa určia v okamihu snímania.

korigovaný bod - je predpokladaný bod na povrchu obrobku vychádzajúci z indikovaného bodu merania. V prípade bezkontaktného snímania (napr. optický snímací systém) môže byť indikovaný bod merania totožný s korigovaným bodom merania.

cieľový bod - je plánovaný bod dotyku na nominálnom integrálnom prvku.

skutočný bod - je bod dotyku medzi zakončením dotykového hrotu a skutočným prvkom.

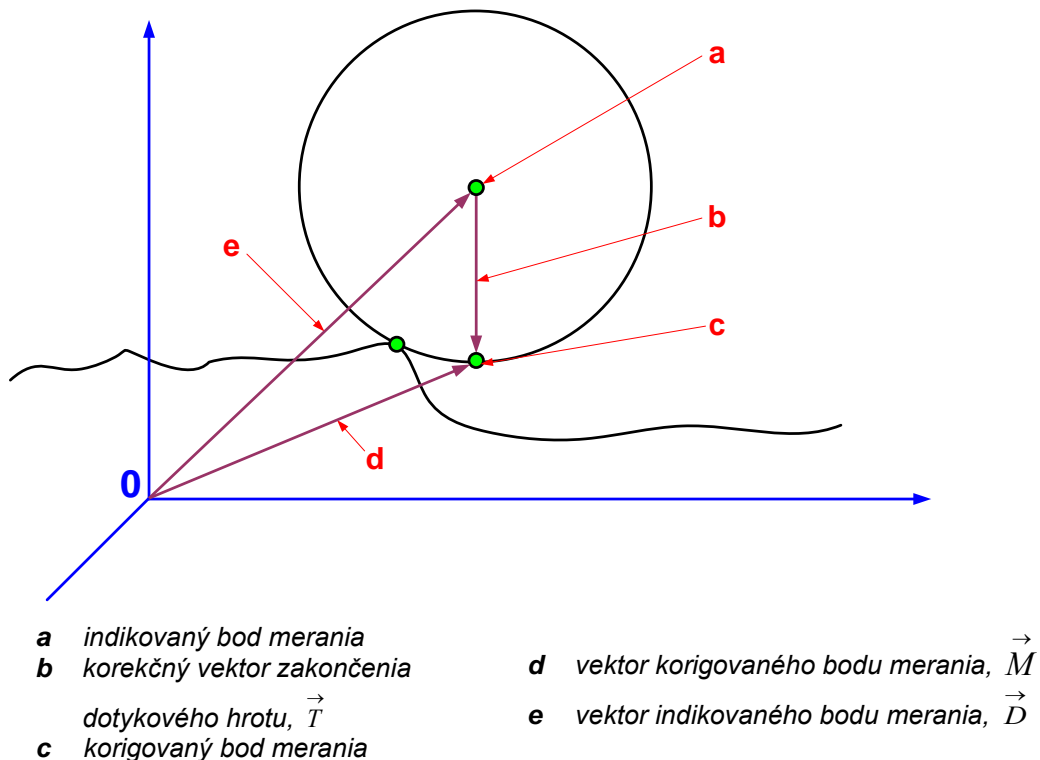
korekčný vektor zakončenia dotykového hrotu (obr.88) - je vektor použitý na preloženie indikovaného bodu do korigovaného bodu merania. Vyjadruje sa rovnicou:

$$\vec{M} = \vec{D} + \vec{T} \quad (9)$$

kde \vec{M} je vektor korigovaného bodu merania,

\vec{D} je vektor indikovaného bodu merania,

\vec{T} je korekčný vektor zakončenia dotykového hrotu.



Obr. 88 korekčný vektor zakončenia dotykového hrotu (zjednodušené zobrazenie) [64]

programovaný bod - je ktorýkoľvek bod vyjadrený súradnicami a použitý na bodom určené riadenie pohybu snímacieho systému.

medziľahlý bod - je osobitný programový bod, v ktorom sa nerobí žiadne snímanie. Tieto body sa zvyčajne využívajú na riadenie pohybu snímacieho systému.

Pri meraní je veľmi dôležité vyvarovať sa falošnému dotyku, ktorého príčiny môžu byť:

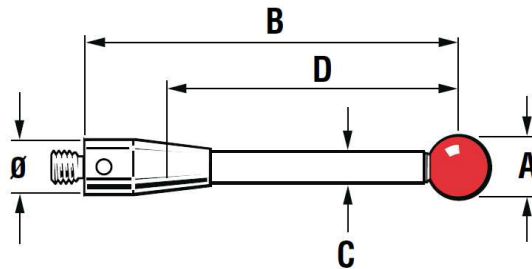
- dotyk driekom sondy,
- nečakaný kontakt sondy s predmetom, ktorý nemá byť na pracovnej doske meracieho stroja,
- príliš dlhý alebo príliš ťažký snímací prvok spôsobujúci moment sily pri akcelerácii meracieho stroja.

3.6 Meracie sondy – zakončenie hrotu dotyku

Dotyk je súčasťou meracieho systému, ktorý sprostredkúva kontakt medzi dielcom a sondou a spôsobuje zopnutie v mechanizme sondy. Signál, ktorý je pritom generovaný, umožňuje zaznamenávanie súradníc zosnímaného bodu. Typ a rozmer použitého dotyku závisí na snímanom prvku. Najdôležitejšími vlastnosťami však zostávajú maximálna tuhosť dotyku a dokonalá guľovitost' guľôčky. [66]

Hlavné rozmery dotyku sú (obr.89):

- A – priemer guľôčky,
- B – celková dĺžka – je to vzdialenosť od stredu guľôčky po osadenie,
- C – priemer drieku,
- D – efektívna činná dĺžka (EWL) – je to maximálna hĺbka merania – pri väčšej hĺbke merania by došlo ku kolízii s dielcom a ku vzniku hrubej chyby merania. [66]



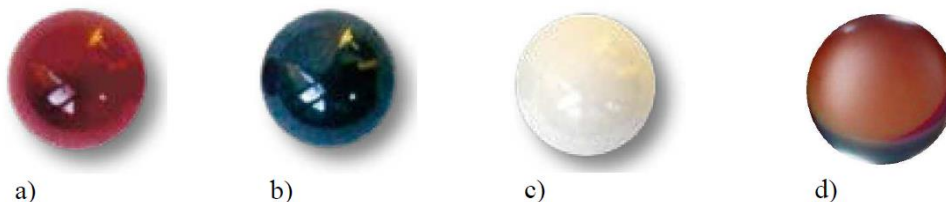
Obr. 89 Hlavné rozmery dotyku [66]

Aby bola zabezpečená najvyššia presnosť merania, treba dodržiavať tieto zásady:

- treba použiť čo najkratší dotyk aby zbytočne nedochádzalo ku jeho priehybu,
- treba voliť čo najmenší počet predlžovacích nadstavcov pretože každý spoj je zdrojom nepresnosti,
- je vhodné použiť čo najväčší priemer guľôčky dotyku, aby bol potlačený vplyv drsnosti súčiastky na presnosť merania a aby nedochádzalo ku kolízii drieku s meraným dielcom, čo by malo za následok vznik hrubej chyby merania.[66]

Materiál zakončenia hrotu dotyku (obr.90):

- rubín,
- nitrid kremíka,
- oxid zirkoničitý,
- diamant.



Obr.90 Materiály guľôčky [39]

Rubín - Priemyslovým štandardom i požiadavkám na optimálny materiál guľôčky vyhovuje u prevažnej väčšiny meracích aplikácií rubín – jeden z najtvrdších materiálov. Rubínové uľôčky majú výnimočne hladký povrch, vynikajúcu pevnosť v tlaku a vysokú odolnosť proti mechanickému poškodeniu. Je iba málo aplikácií, u ktorých rubín nie je uprednostňovaným materiálom guľôčky. Existujú však dva prípady, kde sa odporúčajú guľôčky vyrobené z iných materiálov. [66]

Prvým je použitie výkonných skenovacích aplikácií na hliníkové materiály. Tu môže dochádzať k fenoménu nazývanému adhézny oter, kedy sa na povrchu guľôčky usadzuje hliník. V takýchto prípadoch je lepším materiálom nitrid kremíka. [66]

Druhým sú náročné aplikácie pri skenovaní liatinových povrchov. Vzájomné pôsobenie oboch materiálov môže u rubínovej guľôčky spôsobiť opotrebenie povrchu oterom. U takýchto aplikácií sa odporúčajú guľôčky z oxidu zirkoničitého. [66]

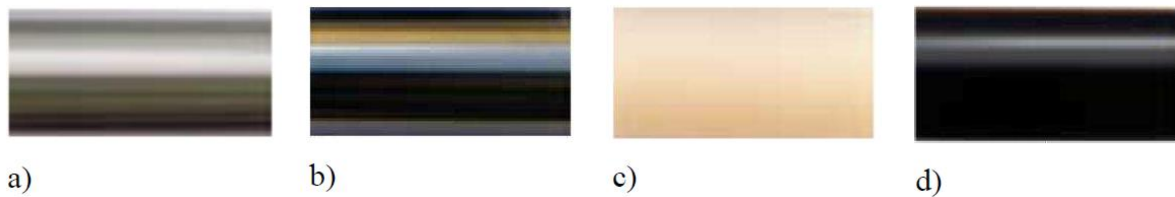
Nitrid kremíka - Nitrid kremíka a rubín majú mnoho spoločných vlastností. Ide o veľmi tvrdý materiál, odolný proti opotrebeniu, ktorý sa dá opracovať do veľmi presných guľovitých tvarov. Dá sa tiež leštiť, čím sa dosiahne vysoko hladký povrch. Medzi nitridom kremíka a hliníkom ku vzájomnému pôsobeniu nedochádza, takže u tejto kombinácii adhézny oter nevzniká. Nitrid kremíka však vykazuje značnú mieru opotrebenia oterom pri kontakte s oceľovými povrchmi, preto ideálnou aplikáciou zostáva jeho použitie pre hliníkové povrchy. [48]

Oxid zirkoničitý - Oxid zirkoničitý je veľmi pevným keramickým materiálom, ktorého charakteristiky tvrdosti a opotrebenia sa približujú kvalitám rubínu. Vďaka vlastnostiam povrchu je ideálnym materiálom pre agresívne aplikácie u liatinových súčiastok. [66]

Diamant - Diamant prekonáva konvenčné materiály vo všetkých aspektoch a ponúka najpresnejšie a najekonomickejšie meranie. Extrémna tvrdosť a hladký povrch diamantovej guľôčky udržuje opotrebenie a trenie na absolútne minimálnej hranici. Diamantové guľôčky sú vhodné pre takmer všetky meracie aplikácie, vrátane veľkého zaťaženia pri skenovaní hliníkových dielcov. [33]

Materiál drieku dotyku obr. 91:

- a) oceľ,
- b) karbid volfrámu,
- c) keramika,
- d) uhlíkové vlákna.



Obr. 91 Materiály drieku [51]

Oceľ

Stopky dotykov vyrobené z nemagnetickej nerezovej ocele sú široko využívaným materiálom pre dotyky s guľôčkou či hrotom s priemerom 2mm či väčším a s dĺžkou do 30mm. V tomto rozmedzí poskytujú kompaktné oceľové stopky optimálny pomer tuhosti a hmotnosti, bez toho, že by bola znížená tuhosť závitovým spojom. [66]

Karbid volfrámu

Stopky z karbidu volfrámu sú optimálnym riešením pre maximálnu tuhosť a minimálny priemer stopky. Tieto parametre sú vyžadované u priemeru guľôčky pod 1mm alebo pre dĺžky do 50mm. Problematická je vyššia hmotnosť dotyku z tohto materiálu a tým i nebezpečenstvo nižšej tuhosti vo spoji u dlhších dotykov. [66]

Keramika

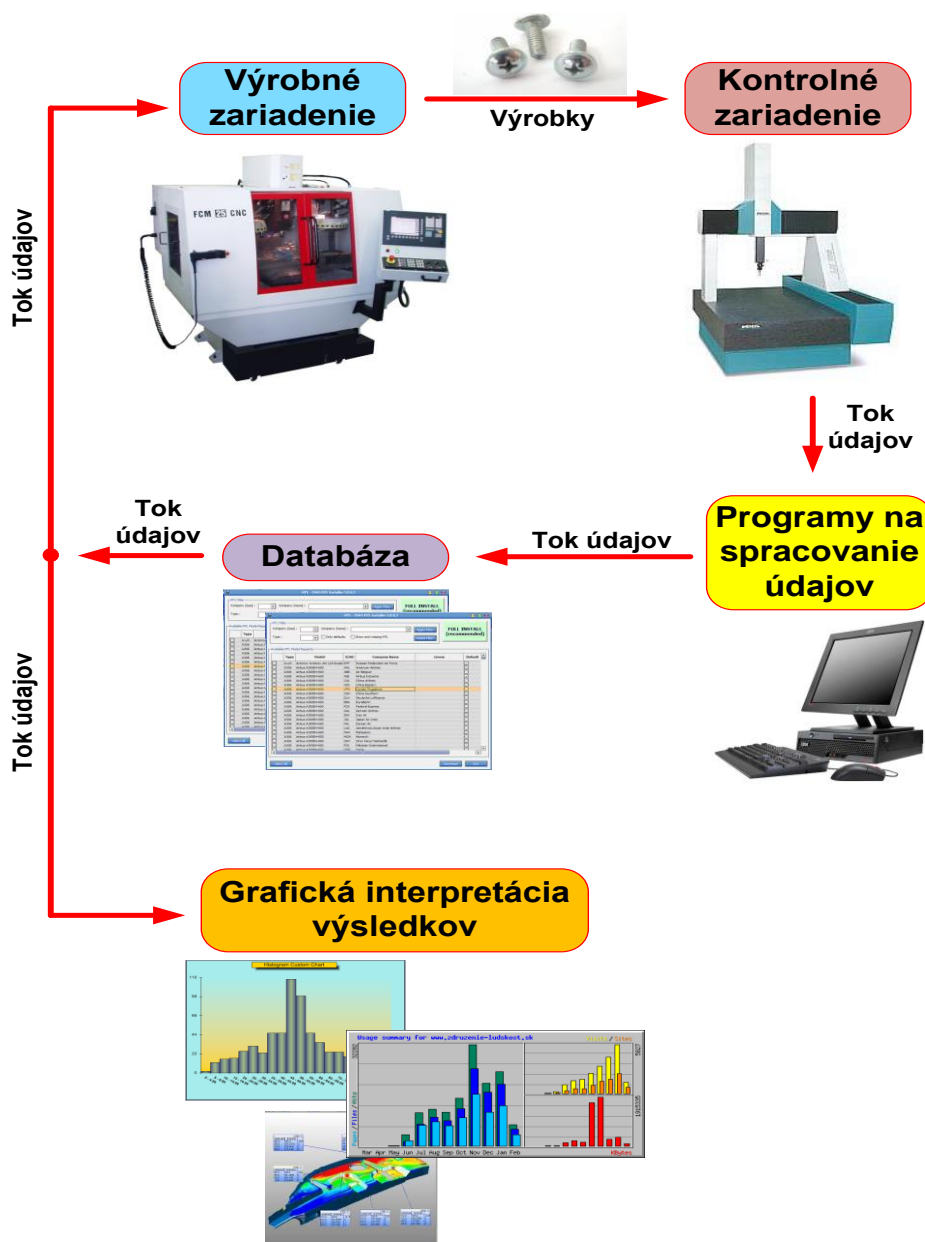
U priemerov guľôčky nad 3mm a pri dĺžkach nad 30mm poskytujú keramické stopky tuhosť porovnateľnú s oceľou. Sú však výrazne ľahšie než karbid volfrámu. Keramické stopky dotykov zaisťujú tiež dodatočnú ochranu sondy proti havárii, lebo dotyk sa v prípade kolízie roztriešti. [48]

Uhlíkové vlákna

Takýto materiál je ideálnym riešením prinášajúcim maximálnu tuhosť a veľmi nízku hmotnosť u dotykov s dĺžkou nad 50mm. Ide o optimálny materiál stopky pre vysoko presné sondy založené na tenzometrickom princípe. Vykazuje vynikajúcu charakteristiku tlmenia vibrácií a zanedbateľný koeficient tepelnej rozťažnosti. [66]

3.6.1 Pracovanie údajov vo výrobe

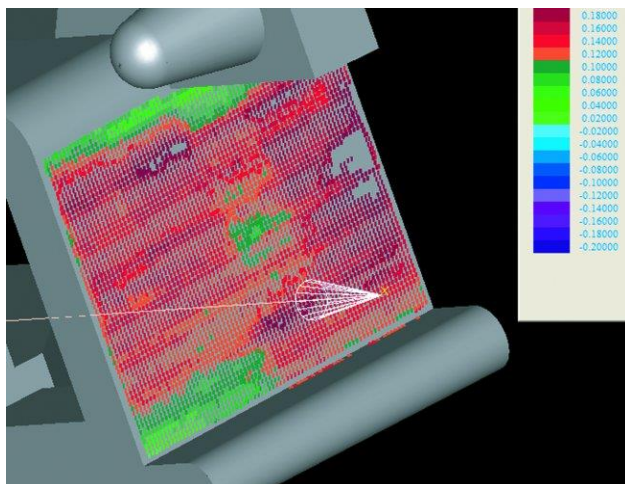
V oblasti výpočtovej techniky sa na takúto prácu (obr.92) používa zvláštna skupina programov, ktoré sa nazývajú databázové systémy (ďalej len DBS). V širšom zmysle tieto systémy zahŕňajú nielen tabuľky, ale aj celý rad operácií, nastavení a výberov. V bežnej praxi sa však s nimi nestretnete v ich pôvodnej podobe.



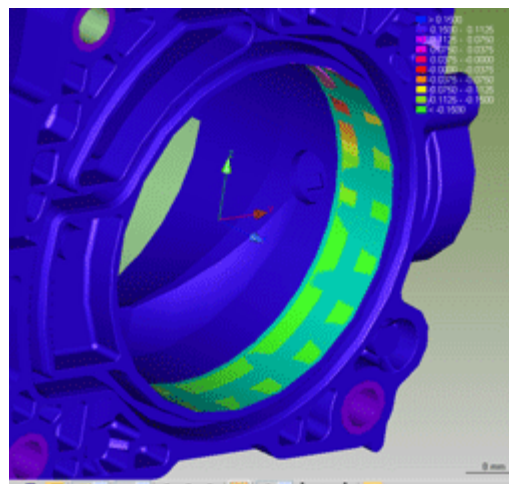
Obr. 92 Priebeh automatizovaného spracovania údajov

3.7 CAD vyhodnotenie merania

Súčasné programy (napr. WinWerth7, Calypso) na obsluhu SMS obsahujú veľké množstvo pracovných modulov. Jedným z nich je aj modul určený na automatizované vyhodnotenie merania pomocou CAD (computer aided design) modelu. Podstata spočíva v zlučení bodov (výrobku), ktoré sú porovnávané s korešpondujúcimi pozíciami na CAD modely. Tieto body sú zobrazené farebne. Ich farba závisí od farebnej stupnice, ktorej hodnota sa dá nastaviť podľa požadovanej tolerancie (obr. 93-94). Základnou podmienkou, aby sa takéto vyhodnotenie mohlo realizovať je stotožnenie nulového bodu výrobku a 3D modelu.



Obr. 93 3D-CAD programu WinWerth [39]

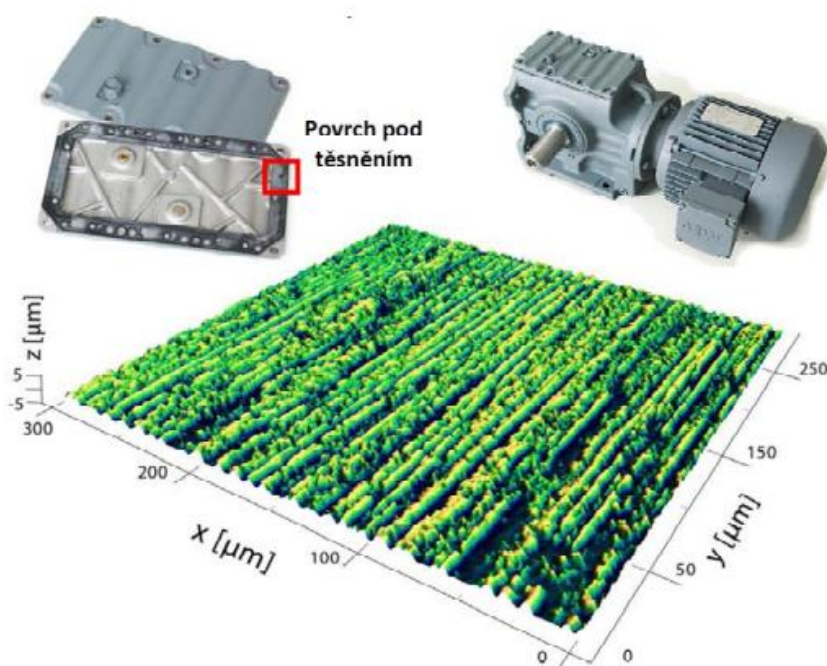


Obr. 94 3D-CAD programu Calypso [87]

4 3D POVRCH - TOPOGRAFIE POVRCHU

3D měření a hodnocení topografie povrchu (Obr.9) je jednou z cest, kam směřuje posun kvalitativně vyšší úrovně komplexního posuzování vlastností povrchu. Patří mezi technicky mnohem náročnější snímání dat pro hodnocení plochy, ale přináší velké množství informací, abychom si mohli udělat realistickou představu o povrchu. Tyto analýzy struktury povrchu mohou mimo početní hodnocení nabídnout také grafické zobrazení formou axonometrického pohledu, topografické mapy nebo záznamu intenzity souřadnic. Při použití 3D topografie povrchu je použita prostorová charakteristika povrchu, což znamená počet, velikost a tvar výstupků profilu a tím se nejen zvyšuje objektivita posuzování, ale díky ní je také možno vysvětlit a vyřešit řady problémů v tribologii a výrobní technologii. Je tím umožněno kvantitativní studium geometrických a rozměrových změn profilu povrchu v různých etapách výrobních procesů součástí nebo po jejich dokončení a dokonce i v průběhu jejich funkce. Je tedy zřejmé, že dochází od původního dotykového měření řady profilů k bezdotykovému snímání nebo je možné použít zařízení, které je vybaveno oběma způsoby snímání se speciálním vyhodnocovacím softwarem.

Moderní interferometrické metody mohou poskytnout rychlé, bezkontaktní a přesné měření topografie povrchů běžných strojních součástí. Např. metoda skenovací interferometrie s využitím bílého světla poskytuje nezbytný vertikální rozsah pro tato měření. Výhodou je zobrazení drsnosti povrchu na celé funkční ploše součásti.



Obr. 95 3D struktura víka převodovky [60]

Současný stav rozvoje měřicí a výpočetní techniky, který je výsledkem úsilí vědců a techniků v posledních desetiletích, již umožňuje nasazení zmíněných přístrojů pro 3D hodnocení topografie povrchu v praxi. Tato skutečnost nastoluje potřebu vypracovat nový, situaci adekvátní postup hodnocení topografie povrchu. V současné době není v mezinárodním měřítku takový postup oficiálně ustanoven, jsou pouze předloženy návrhy standardizace 3D hodnocení topografie povrchů jako běžné metody užívané v praxi, na straně druhé však tento stav poskytuje prostor pro rozvoj nekonvenčních postupů v této oblasti.



Potrebné si zapamätat'

Topografiu chápeme ako priestorovú drsnosť povrchu. Má významné miesto v tribológii.

4.1 Prostorové hodnocení struktury povrchu

Při porovnání prostorového měření textury povrchu s hodnocením jednoho řezu (profilu) povrchu je možné konstatovat, že 3D měření textury povrchu je objektivnější a dává přesnější informace o stavu povrchu s výraznějším větším statistickým významem vyhodnocené charakteristiky. Vyhodnocované prostorové parametry textury vycházejí z podstatně většího množství naměřených dat a mají mnohem vyšší spolehlivost. Z toho vyplývá, že získaná hodnota parametru je mnohem věrohodnější. Při použití prostorového hodnocení struktury povrchu se také podstatně zmenšuje nebezpečí zanedbání vlivu některého z důležitých vlastností povrchu.

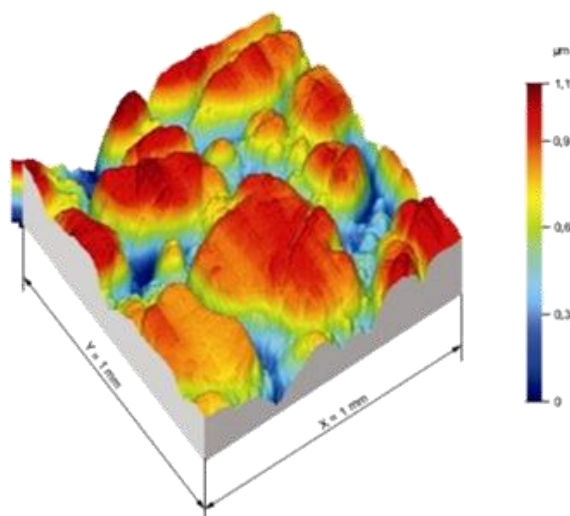
4.2 Rozbor 3D textury povrchu

K získávání hodnot pro prostorové hodnocení textury povrchu (Obr.95) je možné použít buď měření dotykovým přístrojem anebo bezdotykovým optickým přístrojem, který je založen na využití snímacích paprsků.

Použití rozdílných způsobů získávání dat způsobuje také rozdíly ve výsledcích měření, které jsou dány především rozličnými principy snímacích systémů, různou přesností měření a interakcí přístrojů s kontrolovanými povrchy.

K tomu, aby mohla být použita 3D metoda měření textury povrchu v praxi je nutné provést důkladnou přípravu, která může odpovědět na základní otázky:

- co, jak a čím měřit a vyhodnocovat
- jak prakticky využít získané výsledky kontroly.

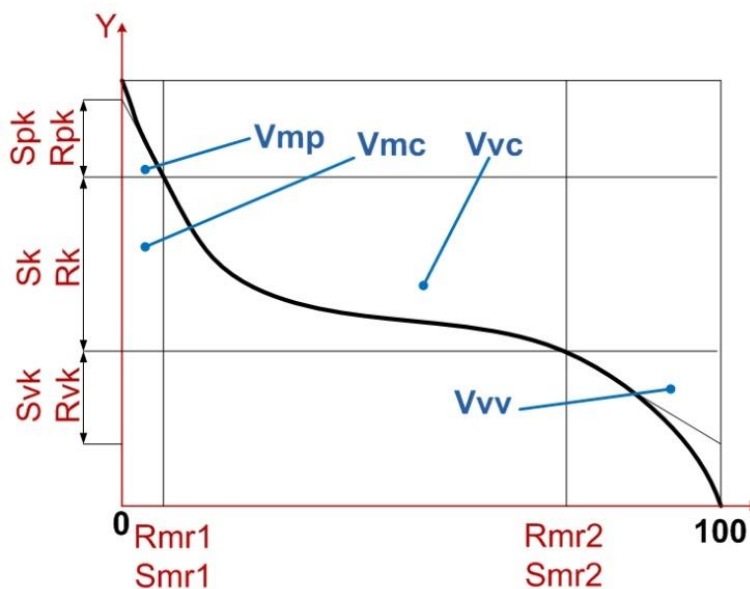


Obr. 96 3D (prostorové) zobrazení textury povrchu včetně barevné charakteristiky výšek nerovností povrchu

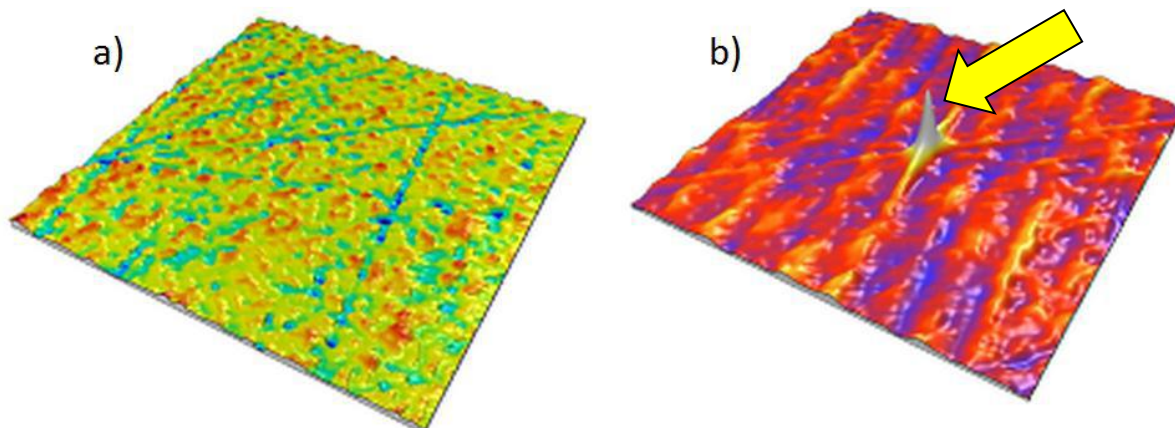
K základním předpokladům správného vyhodnocení 3D textury povrchu v praxi je nutné znát příslušnou ISO normu.

4.3 Parametry k vyhodnocení 3D povrchu

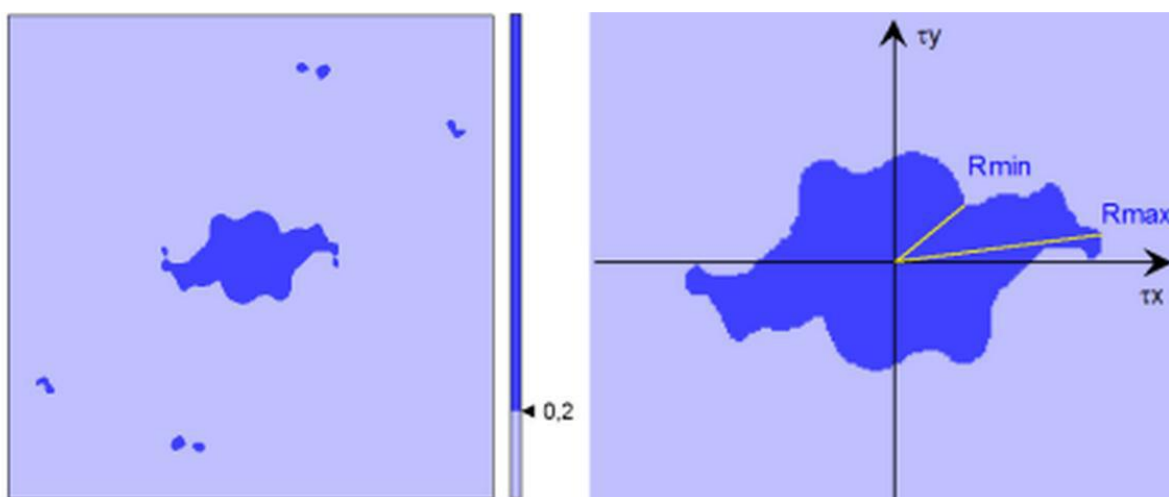
U výškových parametrů se využívá rozložení souřadnic povrchu obr.95. Zpravidla vycházejí z 2D parametrů profilů, které jsou definovány v ISO 4287. Součástí jsou maximální výšky profilu, průměrné úchytky, šikmost a špičatost křivky rozdělení.



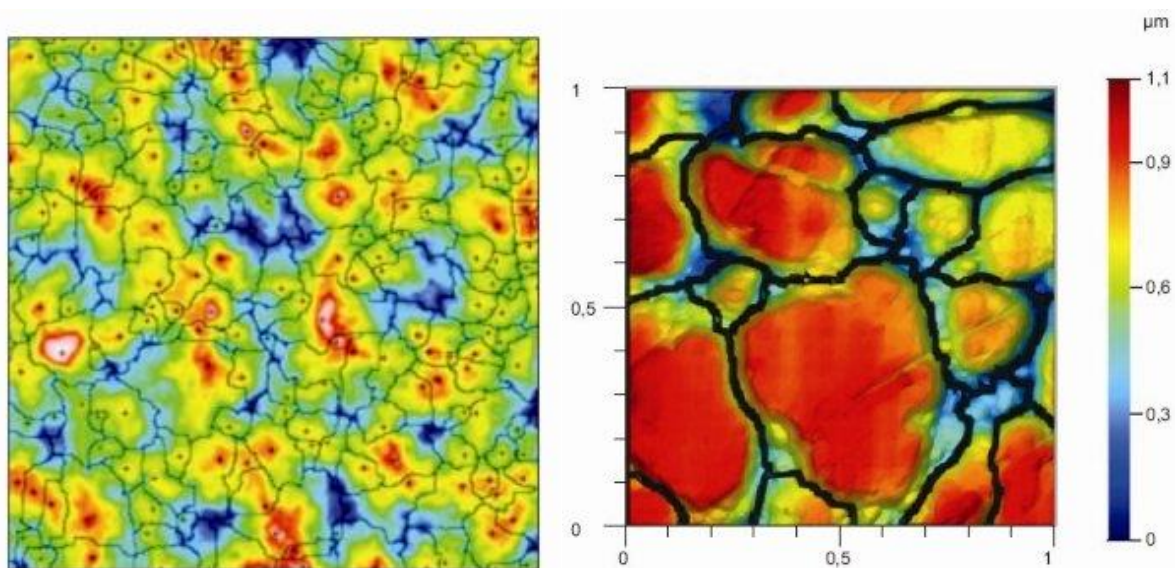
Obr. 96 Grafické schéma stanovení funkčních objemových parametrů (V_{mp} , V_{vc} , V_{mc} , V_{vv}), Osa X – prostorový materiálový poměr % Osa Y - výška[61]



Obr. 97 Grafické znázornění autokorelační funkce. a) původní povrch, b) autokorelace. [40]



Obr. 98 Analýza prahu autokorelace, detail na řez vrcholem [40].



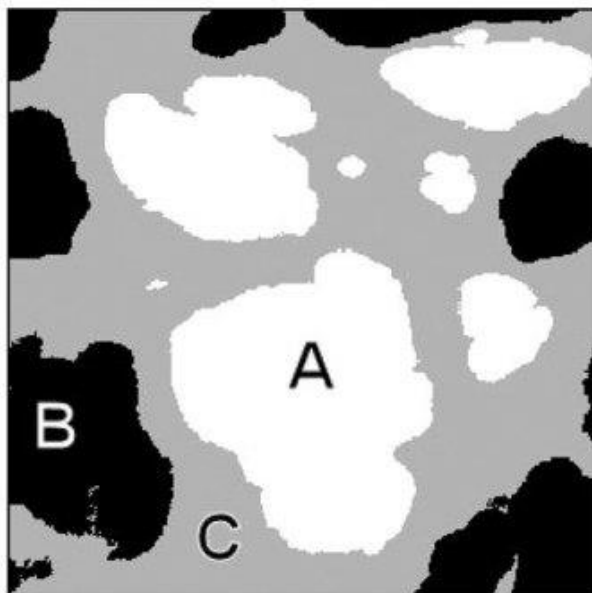
Obr. 99 Povrch po segmentaci obsahuje 179 motivů s Wolfovým omezením 3 % Sz. Motivy jsou vymezeny kurzovými čarami s vrcholy označenými křížky. [8]

Obr. 100 Výstupky povrchu při uplatnění Wolfova omezení 10 % Sz. Rozměr vzorku je v mm. [8]

K vyhodnocení periodičnosti nebo nahodilosti profilu tvaru povrchu využívají prostorové parametry autokorelační funkci obr. 97. Grafické znázornění autokorelační funkce obsahuje vždy centrální vrchol o normalizované amplitudě. Tvar centrálního vrcholu indikuje míru izotropie povrchu, která je určena na základě analýzy prahu autokorelace - pomyslného řezu vrcholem v doporučené výšce 20% - kdy se tento řez materiálem zobrazí jako tmavé skvrny. Na základě tohoto řezu je dále určen poměr aspektu textury Str, který vyjadřuje charakteristiku řezu centrálním vrcholem. Představuje poměr mezi minimální a maximální vzdáleností okraje řezu od středu centrálního vrcholu [40]. Tyto vzdálenosti jsou označovány Rmin a Rmax, viz obr. 98. Tento parametr Str může nabývat hodnoty mezi 0 a 1 nebo může být také vyjádřen v procentech. Pokud se textura povrchu vyznačuje stejnými nebo velmi podobnými charakteristikami ve všech směrech, pak budou Rmin a Rmax přibližně stejné, řez vrcholem se bude blížit kruhu, a tudíž Str se bude blížit k hodnotě 1.

Pro posouzení funkčních vlastností povrchu se využívají integrální metody, které jsou zahrnuty do hodnocení textury a jsou perspektivním krokem ke kvalitnímu vyhodnocení povrchu obr.99.

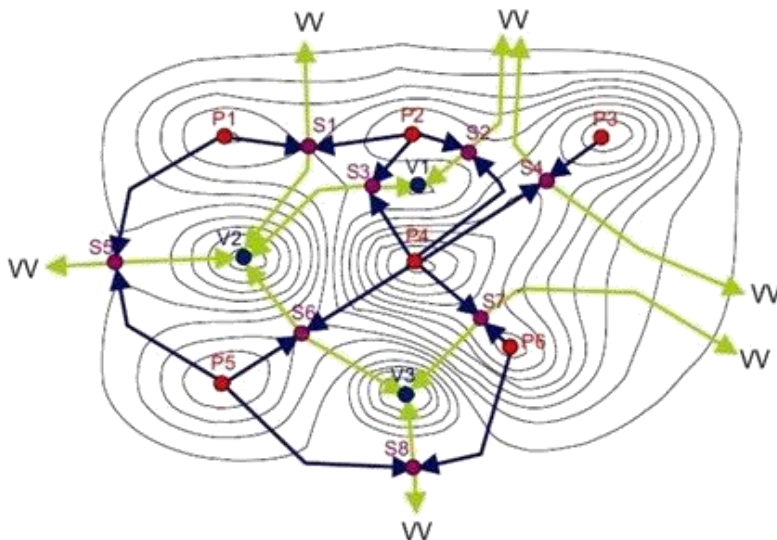
Dalšími parametry, které je možné vyhodnocovat, jsou hybridní parametry charakterizující propojení amplitudových kritérií s prostorovými. Mezi ně patří sklony, zakřivení atd. Díky těmto parametrům je možné posuzovat průměrný tvar výstupků nebo složitost tvaru povrchu obr.100 a obr. 101. [54]



Obr. 101 Stanovení významnosti vlastností – výstupky nad mezí 50 % materiálového poměru jsou rozděleny na uzavřené (bílé, B), otevřené (černé, B) a otevřené prohlubně (šedé, C) [54]

4.4 Charakteristika vlastností povrchu

Nejdůležitějším parametrem pro charakteristiku vlastností povrchu je jeho provozní využití obr.102. Požadované vlastností povrchu jsou různé v závislosti na aplikacích daného povrchu a na významnost a skutečnou funkci povrchu.



Obr. 102 Obrysová mapa povrchu s vyznačenými kritickými liniemi a body, která ukazuje výškové změny plochy povrchu, např. při postupném plnění prohlubní vodou P – výstupky S – sedlové body V – prohlubně VV – virtuální prohlubně[54]

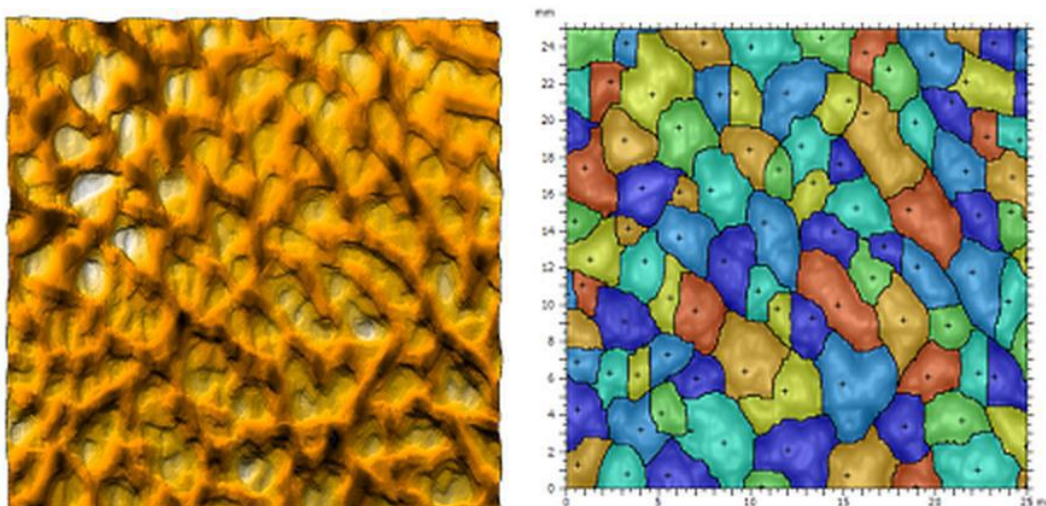
Na základě normy je doporučeno určit charakteristiku vlastností povrchu dle následujícího postupu:

- výběr typu vlastností textury povrchu,
- segmentace,
- určení významných vlastností,
- výběr charakteristik vlastností,
- statistická kvantifikace charakteristik vlastností.

Na základě standardů se rozlišují tři hlavní typy texturních vlastností:

- plochu,
- lineární (linie),
- bod.

K určení oblastí povrchu splňujících definované vlastnosti slouží segmentace obr.103. V první řadě se určují všechny vrcholy a prohlubně a poté jsou upravovány velikosti segmentů. Norma určuje velikost kritéria pro segmentaci.



Obr. 103 Metoda segmentace: a) původní povrch, b) segmentace povrchu [40]

Patříčnou důležitost jednotlivým vlastnostem dává skutečná funkce daného povrchu. To je důvodem, aby se v dalším kroku segmentace rozdělili vlastnosti na funkčně významné a méně významné. Po stanovení významných vlastností pro konkrétní aplikaci je třeba stanovit atributy vlastností pro jejich charakteristiku. Většinu atributů představují velikostní hodnoty vlastností – délky, plochy nebo objemy. Závěrem je třeba funkčně významné vlastnosti povrchu vhodným způsobem statisticky zpracovat. K tomu norma doporučuje využít hodnoty průměrné, maximální i minimální, střední kvadratické hodnoty (Rms), procentuální nebo sumární vyjádření, příp. hustotu (četnost).

Pro konečnou charakteristiku vlastností povrch se analyzuje hustota výstupků (Spd), aritmetický průměr zakřivení výstupků (Spc), ale i uvedení průměrných ploch a objemů vyvýšenin a prohlubní. Tyto parametry udávají informaci o dosedacích či těsnicích plochách, co se týče množství bodů dotyku na jednotku plochy (Spd) nebo míru plastické a elastické deformace plochy při zatížení (Spc). Navíc jsou tyto parametry statisticky stabilní.[50]

Správné a přesné vyhodnocení prostorové textury povrchu je možné jen za předpokladu, že jsou k dispozici vhodné měřicí a vyhodnocovací prostředky. Na trhu existuje několik výrobců měřicí techniky, kterou je možné pro tyto účely použít, např.: TalyMap, Programem Mountains, Texture Surfaces a další.

4.5 4D – progresivní analýza změn textury povrchu

Programy 4D analýz profilu povrchu otevírají kvalitativně další etapu kontroly a hodnocení vlastností povrchu ve výzkumu i výrobě. Hlavním přínosem nové 4D metody hodnocení je rozšíření stávajících 3D analýz o další proměnnou, která charakterizuje funkci povrchu.

Unikátnost novinky spočívá ve skutečnosti, že v uvedeném programu je dosud používané prostorové (3D) hodnocení povrchu (x, y, z) doplněno čtvrtým „rozměrem“ – proměnnou (t), kterou může být čas, teplota, tlak nebo jiný fyzikální parametr. Takto lze vyhodnocovat nejen statické vlastnosti zkoumaného povrchu, ale především sledovat změny textury povrchu v průběhu jeho funkčního zatěžování. Aplikace 4D analýzy je virtuálně neomezená a umožní u celé řady povrchů studium opotřebení, koroze, eroze, změn nanostruktur a kompozitních materiálů, deformace tepelně zatěžovaných součástí, vznik i vývoj povrchových trhlin, delaminace povrchových vrstev a mnoha dalších procesů.

4.6 Využití prostorového vyhodnocení textury povrchu v praxi

I když je v současné době připravena řada přístrojů pro měření a vyhodnocování prostorové charakteristiky textury, je zřejmé, že praktické zvládnutí přechodu z hodnocení jednoho profilu na plochu, představuje dlouhodobý proces. Využití kvalitativně nové metody hodnocení textury povrchu bude vyžadovat řešení nebo upřesnění řady problémů spojených nejen s vlastním měřením povrchu, ale i zpracováním výsledků a především s efektivním využitím získaných výsledků. O úspěšnosti prosazování prostorové kontroly textury povrchu v metrologické praxi budou nepochybně rozhodovat nejen technická, ale i ekonomická hlediska.

ZÁVER

Analýza vlastností povrchových vrstiev napomáha k celkové hodnotenie vplyvu technologických procesov a ich podmienok. Aby však bolo možné správne vyriešenie danej problematiky, je stále nutné vykonávať funkčné skúšky (napr. únavové apod.), na základe ktorých je možné aspoň približne určiť kvalitu a stav vyrobenej súčiastky.[79]

Problém i obsah integrity povrchu funkčných plôch súčiastok bol definovaný už začiatkom druhej polovice 20. storočia, kedy bola zistené, že je potrebné dávať do súvisu podmienky technologických operácií s požiadavkami kvality, funkčnosti a spoľahlivosti súčiastok a zariadení. [4]

Aj napriek tomu, že poznáme faktory, ktoré ovplyvňujú integritu povrchu, neexistuje spôsob, ktorým by bolo možné komplexne vyhodnotiť obrobenu plochu z hľadiska integrity. Je možné namerať hodnoty jednotlivých ovplyvňujúcich faktorov (napr. drsnosť, zvyškové napätia a pod.), avšak relevantné vzťahy medzi jednotlivými faktormi aj v súčasnej dobe nie sú dostatočne prebádané. Zatiaľ najspoľahlivejším spôsobom skúšky integrity je samotná prevádzka skúmanej súčiastky. [81]

LITERATÚRA

- [1] ADÁMEK, T. 2008. Dokončovací obrábění termoplastů : diplomová práce. Zlín
- [2] AICHLER, J. 2009. Systém managementu měření : diplomová práce. Brno : VUT, 2009.
- [3] BÁTORA, B., VASILKO, K. Obrobené povrchy. Technologická dedičnost, funkčnost. Trenčianska univerzita v spolupráci s vydavateľstvom GC Tech, 2000; ISBN 80-88914-19-1
- [4] BUMBÁLEK, B. Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. In: Consulting point pro rozvoj a spolupráce v oblasti řízení inovací a transferu technologií - konference. Brno, 2011. ISBN 978-80-214-4352-5
- [5] Comtec 3D, Metrolog V5, dostupný na internete: <http://www.comtec3d.pl/oprogramowanie-metrologV5>
- [6] CULLITY, B. D., STOCK, S: R. Elements of X-ray diffraction. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1956.
- [7] Doteky a příslušenství, 2007. [online]. 2007, [cit. 2011-02-06]. Dostupné online:<http://resources.renishaw.com/cs/details/Technick%C3%A9+parametry%3A+Doteky+a+p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD%2818153%29>
- [8] Dovica, M.; a kol.: Metrologia v strojárstve, TU – Košice 2006. ISBN 80-8073-407-0.
- [9] Faro, Laser ScanArm, dostupný online: <http://www.grupoabstract.com/products/hardware/brazo.htm>
- [10] FITZPATRICK, M. E., FRY, A. T., HOLDWAY, P. et col. Determination of Residual Stresses By X-ray Diffraction. National Physical Laboratory, 2005. ISSN 174-3911PROTO
- [11] GANEV, N. Poznání nehmotného světa zbytkových napětí, Seminář Integrita, Praha, 2013
- [12] Hexagon Metrology GmbH, The ISO 10360 - Acceptance tests for SMSs, dostupný online: URL<http://www.leitzmetrology.com/iso_10360_coordinate_measuring_machines_SMSs.shtml>
- [13] CHLACHULA, P. 2007. Charakteristiky pro popis struktury třecích povrchů :bakalárska práca. Brno : VUT, 2007. 29 s.
- [14] CHRISTOPH, R., NEUMANN, H.: Multisenzorová souřadnicová měřicí technika, D-80992 München, 2008
- [15] Chudý, V., Palenčár, R.,Kureková, E., – Halaj, M.: Meranie technických veličín, STU, Bratislava, 1.vydanie, 1999, ISBN 80-227-1275-2
- [16] INTEGRITY TESTING LABORATORY. www.itlinc.com. Dostupné online [cit. 2014-07-10]
- [17] Kompletní řešení přímo od Renishaw, dostupné online: <http://www.renishaw.cz/cs/10487.aspx>
- [18] Kureková, E., Gabko, P., Halaj, M.: Technické meranie - Zväzok II, Ing. Peter Juriga - Grafické štúdio, Bratislava 1. vydanie, 2005 , ISBN 80-89112-04-8, Modul M28 str.649-657
- [19] MÁDL, J. Integrita povrchu po obrábění. In Manufacturing and industrial Engineering. Vol. 7, Prešov, 2008.

- [20] Macháček, P.: Souřadnicové měřicí stroje, dostupný online: URL<<http://technologie.fs.cvut.cz:8080/metrologie/podklady-pmtr/01-prednaska-PMTR-Souradnicove-merici-stroje.ppt/view>
- [21] MALEC, J. Integrita povrchu, brusné spáleniny a přístrojové možnosti hodnocení. Dostupné online [2013-07-18]
- [22] Metrologic Group Newsletter, dostupný online: http://www.metrologic.fr/new_s_letter/news_Mars_2006_fr.htm
- [23] Metrologic Group Newsletter, Silma XG , dostupný online: http://www.metrologic.fr/Sp/silma_xg.htm
- [24] Mitutoyo, Souřadnicové měřicí stroje, dostupný online: <http://www.mitutoyo.cz>
- [25] NECKÁŘ, F. Vliv technologie výroby na kvalitu povrchové vrstvy. In: Konference DT Žilina, 1982.
- [26] NESLUŠAN, M., TUREK, S., BRYCHTA, J., ČEP, R., TABAČEK, M. Experimentálne metódy v trieskovom obrábání, Žilinská univerzita v Žiline, 2007, ISBN 978-80-8070-711-8
- [27] Nezdařilová, M. Metrologická confirmace měřidla. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Bakalářská práce, 2011.
- [28] online: <http://www.dd-technologies.com/styli.html>
- [29] Palenčár, R., Halaj, M.: Metrologické zabezpečenie systémov riadenia kvality, STU, Bratislava, 1998, 1. vydanie, 80-227-1171-3
- [30] Palenčár, R., Kureková, E., Vdoleček, F.: Systém riadenia merania, Grafické štúdio, Bratislava, 2001, 1. vydanie, ISBN 80-968449-7-0
- [31] Pernikář, J., Tykal, M., Vačkář, J.: Jakost a metrologie, Část metrologie, CERM Brno, 2004
- [32] PEŠIČKA, J. a SKOPAL, L.: Geometrická specifikace produktů (GPS)-Geometrické tolerování-Požadavek maxima materiálu (MMR), požadavek minima materiálu (LMR), požadavek reciprocity (RPR). Praha : Český normalizační institut, 2008.
- [33] Precision styli, 2009. [online]. 2009, [cit. 2014-05-05]. Dostupné online: <http://www.renishaw.cz/cs/na-spicece-pruvodce-pro-vyber-doteku-pro-souradnicovy-merici-stroj--10927>
- [34] Prima Bilávčík, Laser Line Probe V3, dostupný online: <http://www.merici-pristroje.cz/souradnicove.php?txt=307&lg=CZ>
- [35] Prima Bilávčík, Souřadnicové stroje, dostupný online: <http://www.merici-pristroje.cz/souradnicove.php?txt=324&lg=CZ>
- [36] Proto Manufacturing. www.protoxrd.com. Dostupné online [cit. 2014-02-17]
- [37] SKOČOVSKÝ, P. Náuka o materiáli pre odbory strojnícke. Žilinská univerzita v Žiline, 2001, ISBN 80-7100-831-1
- [38] Sláma, J.: Technologie seřizování nástrojů laserem, dostupný online: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-serizovani-nastroju-laserem>
- [39] Sphere for SMS Measuring styli, 2011. [online]. 2014, [cit. 2014-02-05]. Dostupné
- [40] Surface Metrology Guide. [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.digitalsurf.fr/en/guide.html>

- [41] Svoboda, P – Brandejs J., přednáška: Geometrické tolerance, geometrická přesnost, 2005.
- [42] Systém riadenia bázy dát, dostupný online: http://fel.utc.sk/~nagy/IS/PDF/IS_K5.pdf
- [43] Štoll, S.: Mnoho zubů pro lepší přesnost, dostupný online: http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/47/4739_big.jpg
- [44] Štoll, S.: Mnoho zubů pro lepší přesnost, dostupný online: http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/47/4738_big.jpg
- [45] TICHÁ, Š. – ADAMEC, J. 2008. Návod do cvičení z předmětu strojírenská metrologie. Ostrava, 2008. 90 s.
- [46] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F. Kvantifikácia zvyškových napätí tenzometrickými metodami. Grafotlač, Prešov, 2005
- [47] TRMAL, G. J., HOLEŠOVSKÝ, F. Wave shift and its effect on surface quality in superabrasive grinding. Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol 41, 2001UTB, 2008
- [48] Veselovský, J. : Technická dokumentácia a CAD, kapitola 17: GEOMETRICKÉ TOLERANCIE, 2002
- [49] VLK, M. a kol. Experimentální mechanika. Brno 2003, Dostupné online: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/_studium/_opory/Experimentalni_mechanika.pdf [cit. 2014-07-11]
- [50] WANG, J., X. JIANG, E. GURDAK, P. SCOTT, R. LEACH, P. TOMLINS, L. BLUNT, F. BLATEYRON, E. NOVAK a N. BLEWETT. Numerical characterisation of biomedical titanium surface texture using novel feature parameters. Wear [online]. 2011, vol. 271, 7-8, s. 17-41 [cit. 2014-05-21]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-190399611-9/50002-5>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164811003905>
- [51] WITHERS, P. J., BHADESHIA, H.K.D.H. Overview: Residual Stress, Part 1 – Measurement. Cambridge. IoM Communications Ltd, 2001
- [52] ZEISS, merací softvér CALYPSO, dostupný online: <http://www.zeiss.sk/C12571AF002C60A4/ProductFinder/74A094FCBD882FB9C1257568002E112C>
- [53] ZIMEK, A.: Analýza nejistot měření při použití souřadnicového měřicího stroje, 2007. [online]. 2007, [cit. 2011-02-11]. Dostupné online: http://autnt.fme.vutbr.cz/szz/2007/DP_Zimek.pdf
- [54] [online]. 2014, [cit. 2014-01-05]. Dostupné online: <http://fresh.amazon.com>
- [55] [online]. 2014, [cit. 2014-01-05]. Dostupné online: <http://www.gamin.cz>
- [56] [online]. 2014, [cit. 2014-02-03]. Dostupné na internetu: <http://www.mmspektrum.com/clanek/standardni-prostorove-hodnoceni-textury-povrchu.html>
- [57] [online]. 2014, [cit. 2014-02-03]. Dostupné online: <http://www.advanceddimensionalmanagement.com/geometric-dimensioning-and-tolerancing-gdt/>
- [58] [online]. 2014, [cit. 2014-02-03]. Dostupné online: <http://www.amazon.com>
- [59] [online]. 2014, [cit. 2014-02-03]. Dostupné online: http://www.dimcax.com/gdt_web/march-06.htm
- [60] [online]. 2014, [cit. 2014-02-03]. Dostupné online: <http://www.imecoth.cz>
- [61] [online]. 2014, [cit. 2014-02-03]. Dostupné online: <http://www.meranie.sk>

- [62] [online]. 2014, [cit. 2014-02-03]. Dostupné online: <http://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/>
- [63] [online]. 2014, [cit. 2014-02-03]. Dostupné online: <http://www.renishaw.cz/cs/laserovakalibrace-a-diagnosticky-system-ballbar-6330>
- [64] [online]. 2014, [cit. 2014-02-03]. Dostupné online: <http://www.zeiss.sk>
- [65] [online]. 2014, [cit. 2014-05-03]. Dostupné online: <http://www.kvs.tul.cz/>
- [66] [online]. 2014, [cit. 2014-05-03]. Dostupné online: http://www.mzds.cz/108_Kalibrace_&_test_SMS.pdf
- [67] [online]. 2014, [cit. 2014-06-03]. Dostupné online: <http://web.tuke.sk>
- [68] [online]. 2014, [cit. 2014-1-03]. Dostupné online: <http://coordinate-measuring-machine.net/uncategorized/styli-configuration-types/>
- [69] [online]. 2014, [cit. 2014-1-03]. Dostupné online: <http://www.coord3-cmm.com/cmm-styli-types-and-configurations/#thethe-tabs-2-9>
- [70] [online]. 2014, [cit. 2014-1-03]. Dostupné online: <http://www.indiamart.com/metronicservices/cmm-accessories.html>
- [71] [online]. 2014, [cit. 2014-11-03]. Dostupné online: <http://blog.nikonmetrology.com/2010/05/>
- [72] [online]. 2014, [cit. 2014-11-03]. Dostupné online: <http://www.coord3-cmm.com/cmm-styli-types-and-configurations/#thethe-tabs-1-3>
- [73] [online]. 2014, [cit. 2014-11-03]. Dostupné online: <http://www.mscdirect.com/product/details/55326144>
- [74] [online]. 2014, [cit. 2014-11-05]. Dostupné online: <http://www.renishaw.com/en/types-of-styli-6627>
- [75] [online]. 2014, [cit. 2014-12-04]. Dostupné online: Dostupné na internete: <http://resources.renishaw.com/cs/details/Technick%C3%A9parametry%3A+Doteky+a+p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD%2818153%29>
- [76] [online]. 2014, [cit. 2014-14-03]. Dostupné online: <http://news.thomasnet.com/news/test-measuring-instruments/coordinate-measuring-instruments/80>
- [77] [online]. 2014, [cit. 2014-14-04]. Dostupné online: <http://www.greatgages.com/CMM%20Styli.html>
- [78] [online]. 2014, [cit. 2014-15-03]. Dostupné online: <http://www.tuke.sk>
- [79] [online]. 2014, [cit. 2014-18-03]. Dostupné online: <files.ovmt.webnode.cz/Drsnost%20povrchu.pdf>
- [80] [online]. 2014, [cit. 2014-18-03]. Dostupné online: http://qcidea.en.ec21.com/offer_detail/Sell_CMM_probe_stylus--18350975.html?gubun=S
- [81] [online]. 2014, [cit. 2014-18-03]. Dostupné online: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/33003/BP%20Jitka%20METELKOVA.pdf?sequence=1>
- [82] [online]. 2014, [cit. 2014-21-03]. Dostupné online: <http://ecatalog.mitutoyo.com/CMM-Probes-Touch-trigger-probe-system-C1624.aspx>
- [83] [online]. 2014, [cit. 2014-21-03]. Dostupné online: <http://www.mscdirect.com/industrialtools/stainless-steel-stylus.html>

- [84] [online]. 2014, [cit. 2014-21-03]. Dostupné online: http://www.pmargage.com/styli_main.shtml
- [85] [online]. 2014, [cit. 2014-21-06]. Dostupné online: <http://www.coord3-cmm.com/cmm-styli-types-and-configurations/>
- [86] [online]. 2014, [cit. 2014-23-03]. Dostupné online: <https://store.hexagonmetrology.us/romer-probe-stylus-point-tip-10mm-length-m3-thread>
- [87] 3D CAD, Silma XG, dostupný online: <http://3dcad.pl/software/wiecej /328 /Silma-XG.htm>