

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R016 Dopravní a manipulační technika

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Problematika Geometrické specifikace produktu

Autor: **Kateřina CACHOVÁ**

Vedoucí práce: **Ing. Ivana MAZÍNOVÁ**

Akademický rok 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kateřina CACHOVÁ**
Osobní číslo: **S12B0116P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**
Název tématu: **Problematika Geometrické specifikace produktu**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Proveďte rešerši nově zavedených norem o Geometrické specifikaci produktu (GPS), na příkladech ukažte praktické využití těchto norem.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Úvod do problematiky GPS
2. Rešerše nově zavedených norem GPS
3. Praktické příklady využití norem
4. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **30-40 stran A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

DRASTÍK, F. *Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem.* **Ostrava: MONTANEX, a.s., 1996**

HENZOLD, G. *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection.* **Oxford: Elsevier Ltd., 2006**

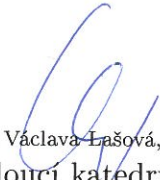
Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Mazínová**
Katedra konstruování strojů
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Ivana Mazínová**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **22. září 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 22. září 2014

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Autorská práva

Podle zákona o právu autorském. Č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat především Ing. Ivaně Mazínové za vedení této bakalářské práce, za nápomoc a za veškeré rady a materiály, které mi během zpracování práce poskytla.

Poděkování patří rovněž mé rodině za podporu během studia.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Cachová	Jméno Kateřina		
STUDIJNÍ OBOR	„Dopravní a manipulační technika“			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Mazínová	Jméno Ivana		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST – KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Problematika Geometrické specifikace produktu			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	68	TEXTOVÁ ČÁST	64	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato bakalářská práce se věnuje tématice geometrické specifikace produktu. Cílem práce je provedení rešerše a ukázat výhodnost používání systému GPS. Dále je vytvořen návrh tolerování přípravku 8bodovým tolerančním postupem IfGPS.
KLÍČOVÁ SLOVA	GPS, geometrické tolerance, geometrické a rozměrové tolerování, systém GPS matrix, TEDs

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Cachová	Name Kateřina	
FIELD OF STUDY	„Transport and handling machinery“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Mazínová	Name Ivana	
INSTITUTION	ZČU - FST – KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Issue of Geometrical product specifications		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	68	TEXT PART	64	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This bachelor thesis is focused on the topic of geometrical product specification. It's purpose is to perform research and demonstrate the advantages of using GPS. There is created a draft tolerancing by 8-point tolerancing procedure.
KEY WORDS	GPS, geometrical tolerances, geometrical dimensioning and tolerancing, systém GPS matrix, TEDs

Obsah

Přehled použitých zkratk	4
1. Úvod	5
1.1. Cíle bakalářské práce	5
2. Rozbor současného stavu	6
2.1. Geometrická specifikace produktu	7
2.1.1. Filozofie GPS	8
2.1.2. Systém GPS matrix	8
2.2. Geometrické tolerance	9
2.2.1. Toleranční pole	9
2.2.2. Toleranční rámeček	11
2.2.3. Základny	11
2.2.4. Rozdělení geometrických tolerancí	12
2.2.5. Geometrické tolerance tvaru	13
Přímost	13
Rovinnost	13
Kruhovitost	14
Válcovitost	14
Tvar profilu	15
Tvar plochy	15
2.2.6. Geometrické tolerance směru	16
Rovnoběžnost	16
Kolmost	16
Sklon	17
2.2.7. Geometrické tolerance umístění	17
Poloha	17
Souosost a soustřednost	18
Souměrnost	18
2.2.8. Geometrické tolerance házení	19
Kruhové házení	19
Celkové házení	20
2.3. Rozměrové tolerance	21
2.4. Závislé tolerance	21

2.4.1.	Podmínka obalové plochy	22
2.4.2.	Podmínka maxima materiálu	23
2.4.3.	Podmínka minima materiálu	24
2.4.4.	Podmínka reciprocity	25
2.5.	Teoreticky přesné rozměry (TEDs)	26
2.6.	Textura povrchu	26
2.7.	Nejistoty měření	30
3.	Rozdíly v tolerování pomocí geometrických a rozměrových tolerancí	33
3.1.	Tolerance polohy	33
3.2.	Tolerance profilu	37
4.	Vlastní řešení	40
4.1.	Stanovení vztažných systémů	47
4.1.1.	Vztažný systém pro upínací desku	47
4.1.2.	Vztažný systém pro podstavu	48
4.1.3.	Vztažný systém pro otočný stůl	49
4.2.	Rozměrové tolerance	49
4.2.1.	Rozměrové tolerance pro upínací desku	49
4.2.2.	Rozměrové tolerance pro podstavu	50
4.2.3.	Rozměrové tolerance pro otočný stůl	51
4.3.	Umístění prvků s pevnými tolerancemi	51
4.3.1.	Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro upínací desku	51
4.3.2.	Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro podstavu	52
4.3.3.	Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro otočný stůl	53
4.4.	Mobilní tolerance	54
4.4.1.	Mobilní tolerance pro podstavu	54
4.4.2.	Mobilní tolerance pro otočný stůl	54
4.5.	Nesouvisející tolerance	55
4.5.1.	Nesouvisející tolerance pro upínací desku	55
4.5.2.	Nesouvisející tolerance pro podstavu	55
4.5.3.	Nesouvisející tolerance pro otočný stůl	56
4.6.	Kombinace tolerancí	57
4.7.	Tolerance textury povrchu	58
4.7.1.	Tolerance textury pro upínací desku	58
4.7.2.	Tolerance textury pro podstavu	58

4.8.	Tolerance hran.....	59
4.8.1.	Tolerance hran pro podstavu	59
4.9.	Celkové výkresy	60
5.	Závěr.....	63
	Použitá literatura.....	64
	Seznam obrázků.....	66
	Seznam tabulek.....	68

Přehled použitých zkratk

GPS	Geometrical Product Specification
TEDs	Theoretical Exact Dimensions
GD&T	Geometric Dimensioning and Tolerancing
ČSN	Česká Státní Norma
EAL	Environmental Analysis Laboratory
ISO	International Organization for Standardization
IfGPS	Institute for Geometrical Product Specification

1. Úvod [2]

Tématem této bakalářské práce je Problematika Geometrické specifikace produktu. Jak již samotný název napovídá, bakalářská práce je zaměřena na geometrické tolerance, které jsou nedílnou součástí výkresové dokumentace a bez kterých by byla vyrobená součást prakticky neprodejná, neboť by nesplňovala požadavky tvarové a rozměrové přesnosti.

V dnešní době je strojírenský průmysl zahlcen celou řadou více či méně podobných výrobků. Aby byl výrobek dané společnosti od zákazníka odkoupen, musí kromě funkčnosti a spolehlivosti splňovat také kritéria tvarové a rozměrové přesnosti, která záleží na rozměrových a geometrických tolerancích, popřípadě na tolerančních řetězcích. Zjednodušeně lze říci, že i kostka na hraní dětských her musí splňovat kritéria geometrických tolerancí, respektive toleranci kolmosti jednotlivých stěn, jinak by nebyla správně zaručena funkčnost herní kostky a některá čísla by padala častěji. Na tomto jednoduchém případu je vidět, jak je předepisování geometrických tolerancí na výkresové dokumentaci důležité pro funkčnost výrobků a strojních součástí.

Pod pojmem geometrická tolerance si můžeme zjednodušeně představit určitou oblast nebo dvojrozměrnou či třírozměrnou plochu, ve které se musí plocha dané strojní součásti nacházet a jejíž hranice nesmí překročit. Každý konstruktér by měl být seznámen s normou, podle níž daný podnik funguje a měl by vědět, kdy danou geometrickou toleranci použít a jak ji správně předepsat na výkresovou dokumentaci, aby technolog správně pochopil, ke které ploše je geometrická tolerance vztažena.

Bakalářská práce se v první části zabývá obecně geometrickou specifikací produktu včetně vysvětlení a předepisování jednotlivých geometrických tolerancí na výkresovou dokumentaci. Dále jsou v bakalářské práci popsány rozdíly v tolerování pomocí geometrických a rozměrových tolerancí, které vedou k levnější výrobě, což se pozitivně projevuje v podnicích zaměřených na sériovou a hromadnou výrobu součástí. V poslední části bakalářské práce je na jednoduché sestavě ukázáno tolerování jednotlivých geometrických tolerancí podle 8bodového tolerančního postupu IfGPS.

1.1. Cíle bakalářské práce

Cílem této bakalářské práce je provedení rešerše problematiky GPS z hlediska předepisování geometrických tolerancí na výkresovou dokumentaci, odlišnosti ve způsobu tolerování pomocí rozměrových a geometrických tolerancí. Dalším cílem této bakalářské práce je vymodelování konkrétních součástí a na nich předvést nové efektivní způsoby tvorby výkresové dokumentace.

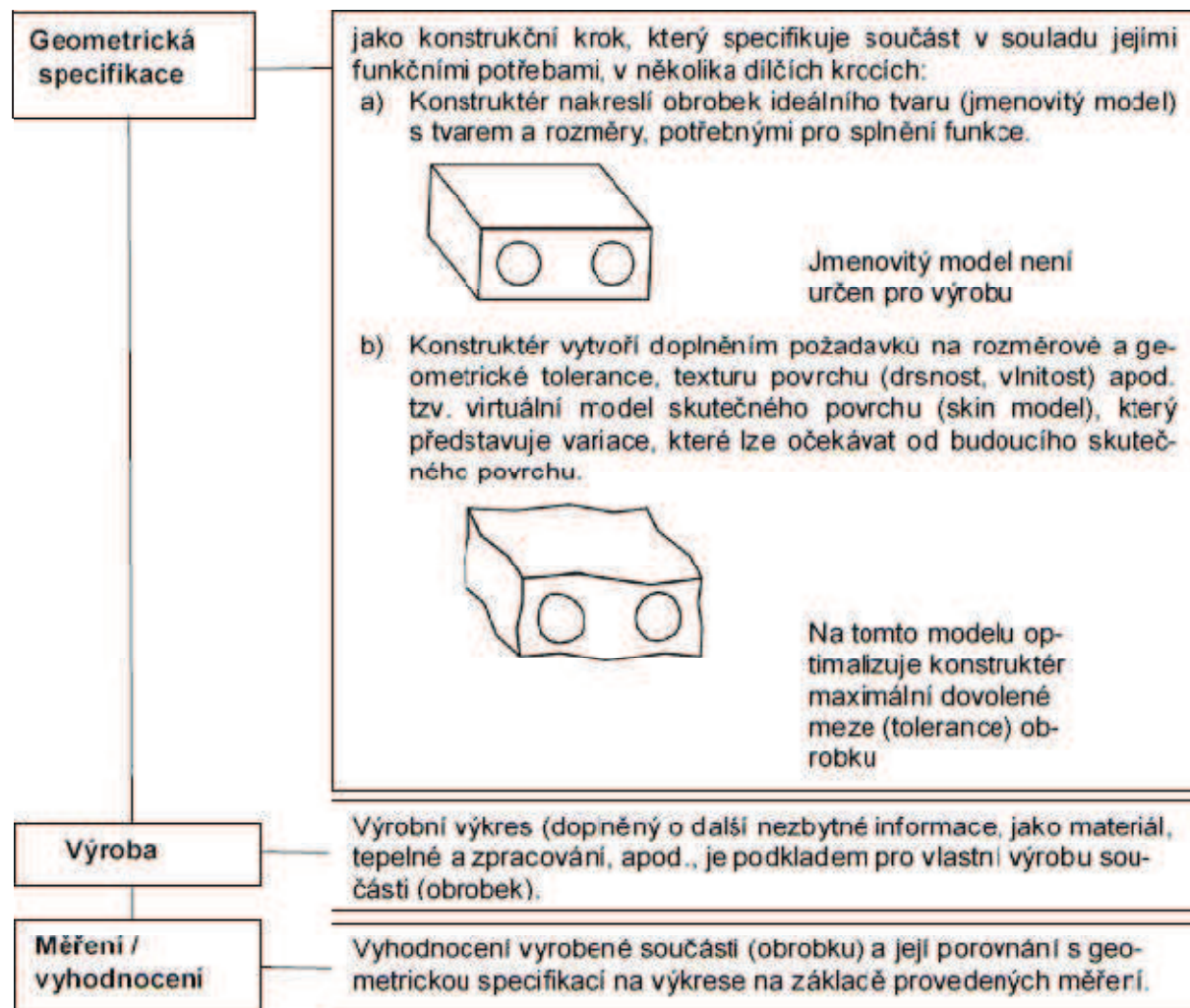
2. Rozbor současného stavu [5], [17], [19], [21], [22]

Špatné rozměry a tolerance jsou významným problémem kvality. Odhaduje se, že až 80% všech výrobních problémů přímo souvisí s nesprávným použitím GD&T. Proto je velmi důležité definovat přípustné odchylky od ideálního tvaru tak jasně, jak jen to je možné. To znamená, že vhodné geometrické a rozměrové tolerance uvedené v technické dokumentaci jsou nezbytné. Ovšem rozhodování o optimálních tolerancích není jednoduché. V první řadě tolerance musí mít vždy vztah k funkci, zadruhé uvedené tolerance musí být vyrobitelné. V další řadě musíme být schopni jednoznačného a opakovatelného měření všech tolerancí. Aby byl konstruktér schopen správně předepsat geometrické a rozměrové tolerance, musí jednak dokonale znát zásady GPS, ale také by měl mít nezbytné vědomosti a zkušenosti týkající se výroby a měření tolerancí.

Ani v dnešním světě moderních technologií, jako jsou například stroje pro kompletní obrábění, není možné vyrábět strojní součásti v naprosto přesných rozměrech ani tvarech, neboť každá vyrobená součást má určitou větší či menší odchylku od optimálního tvaru. Proto je nezbytně nutné, aby konstruktér předepsal na výkresovou dokumentaci správné a navzájem slučitelné geometrické tolerance, plynoucí z jeho vědomostí a dosavadních zkušeností. Pod pojmem geometrické tolerance si můžeme představit maximální přípustné chyby, které nastavují dovolené hranice neboli limity, jak může být každá geometrická charakteristika vzdálená od jmenovitého tvaru neboli tvaru nominálního tak, aby nebyla ohrožena funkčnost a kvalita součástí. Konstruktér by se při předepisování tolerancí neměl řídit jen svými zkušenostmi, ale měl by brát také v úvahu pravidlo, které říká „Tak přesně, jak je to nutné, nikoliv nejpřesněji“. Z tohoto pravidla plyne, že ne vždy je potřeba vyrábět strojní součásti v té největší přesnosti, kterou stroje ve výrobním závodě dovolují, neboť výroba se zbytečně přesnými tolerancemi vede k dražší výrobě a k horší hospodárnosti podniku. Zkušenosti ovšem ukazují, že v praxi je běžné předepisovat tolerance co nejpřesněji, jak dovolují podmínky v podniku, i když to tak není třeba. Jedním z důvodů, proč se tolerance předepisují v průmyslových podnicích co nejpřesněji je ten, že je jednodušší pro konstruktéra získat si informace z výrobního oddělení o maximálních možných přesnostech strojů, než pomocí softwaru provést toleranční studii. Dalším důvodem může být nedostatek zkušeností s předepisováním geometrických tolerancí a jejich následným měřením. Neboť na práci konstruktéra navazuje práce technologa a následně práce výrobního dělníka, je úkolem konstruktéra stanovit jednoznačnou a kompletní specifikaci produktu (součásti) tak, aby se zamezilo v průběhu výrobního řetězce možným problémům.

2.1. Geometrická specifikace produktu [1], [2], [4], [5], [7], [15], [20]

Geometrická specifikace produktu (výrobku), označována zkratkou GPS je souhrnný název pro výčet mezinárodních norem a stanovuje základní vztahy mezi tolerancemi rozměrovými a tolerancemi geometrickými. GPS obsahuje normy, které se týkají jednak požadavků na konstrukci, ale také na vlastní výrobní proces a ověřování (měření) součásti pro posouzení správného tvaru (správné geometrie). Vedle těchto 3 základních oborů, které vystihují výrobu součásti od začátku (tedy myšlenky na výkrese) až po závěrečné měření, se GPS zabývá také normami, které se týkají samotné oblasti zobrazení, kótování a tolerování (např. oblast čar a jejich použití na výkresech, zápisu tolerancí nebo např. kreslení řezů a průřezů). Cílem vývoje GPS je definovat tvarové (geometrické), rozměrové a povrchové charakteristiky obrobku na výkresové dokumentaci tak, aby byla zajištěna správná funkce součásti. Vývoj GPS se snaží o to, aby veškeré charakteristiky strojírenských součástí vedly k celosvětovému jednotnému výkladu a tedy k celosvětovému jednotnému hodnocení kvality na mezinárodním trhu.



Obrázek 1 - Postup vytváření součásti od návrhu po vyhodnocení [7]

2.1.1. Filozofie GPS [2], [4], [5], [8], [15]

Každá vyrobená součást je charakterizována dvěma charakteristikami, a to materiálovou a geometrickou charakteristikou. Materiálová charakteristika je spojena s materiálem, ze kterého je součást vyrobena, popřípadě je ovlivněna dalším tepelným nebo chemicko-tepelným zpracováním. Materiálovou charakteristikou je myšlena například tvrdost, pevnost, nebo houževnatost. Mezi geometrické charakteristiky patří například kolmost, rovinnost nebo rovnoběžnost. Obecně lze tedy říci, že materiálové a geometrické charakteristiky společně určují funkčnost a kvalitu součásti. Zatímco materiálové charakteristiky jsou dány navrženým materiálem a kontrolovány různými zkouškami, geometrické charakteristiky jsou kontrolovány pomocí GPS. Základní myšlenky GPS jsou uvedeny v normě ISO 17450-2.

Hlavní myšlenkou GPS je fakt, že funkčnost a kvalitu součásti lze kontrolovat (hlídat) jednou nebo více geometrickými charakteristikami předepsanými ve výkresové dokumentaci. Z GPS vychází, že není možné požadovat splnění některého požadavku, aniž bychom ho uvedli na výkrese. Zjednodušeně to lze vysvětlit tak, že požadavek kolmosti není splněn, pokud jsou dva prvky k sobě kolmé na výkrese, aniž by byla předepsána geometrická charakteristika (tolerance) kolmosti.

Geometrické charakteristiky definují požadavky na výslednou geometrii, nikoliv na způsob výroby součásti, toto se týká operací soustružení a frézování, neboť pro dokončovací metody musí být uvedena hodnoty drsnosti na výkrese.

2.1.2. Systém GPS matrix [2], [4], [5], [8]

GPS matrix je definován normou ISO 14638 vydanou v roce 1995. Systém GPS matrix je tvořen základními (obsahují základní pravidla pro stanovení rozměrů a tolerování výrobků), globálními, všeobecnými (obsahují pravidla pro předepisování na výkresové dokumentaci) a doplňkovými normami a vytváří integrované a slučitelné řetězce norem, kde se jednotlivé normy řetězce navzájem ovlivňují, tudíž je nutná znalost ostatních norem příslušného řetězce, aby došlo ke správnému porozumění a použití dané normy.

Jeden řetězec obsahuje všechny vzájemně se ovlivňující (závislé) normy, týkající se stejných geometrických vlastností nebo požadavků. Geometrie obrobku je ovlivněna osmnácti geometrickými vlastnostmi, které jsou pomocí jednotlivých norem zařazeny do příslušných řetězců, které jsou následně uvedeny v GPS matrix systému. Jednotlivé geometrické vlastnosti jsou uvedeny níže:

- | | |
|---|----------------------|
| 1) Velikost | 10) Poloha |
| 2) Vzdálenost | 11) Obvodové házení |
| 3) Rádus | 12) Celkové házení |
| 4) Úhel | 13) Základny |
| 5) Profil čáry nezávislý na základně | 14) Profil drsnosti |
| 6) Profil čáry závislý na základně | 15) Profil vlnitosti |
| 7) Profil povrchu nezávislý na základně | 16) Základní profil |
| 8) Profil povrchu závislý na základně | 17) Vady povrchu |
| 9) Směr | 18) Hrany |

Jednotlivé řetězce systému GPS matrix obsahují normy, které obecně odpovídají vývojovým fázím výrobku a vyjadřují vztah mezi obrobkem definovaným návrhem, výrobou a měřením kvality (jakosti). Jednotlivé řetězce jsou:

Řetězec 1 – obsahuje skupinu norem, které se týkají a které vysvětlují zapisování vlastností výrobku na výkresovou dokumentaci

Řetězec 2 – obsahuje skupinu norem, které se zabývají vlastním tolerováním součásti

Řetězec 3 – obsahuje skupinu norem, které vysvětlují definice skutečného tvaru součásti

Řetězec 4 – obsahuje skupinu norem, zabývající se stanovováním odchylek

Řetězec 5 – obsahuje skupinu norem, které určují požadavky na měřidla

Řetězec 6 – obsahuje skupinu norem, které určují požadavky na kalibraci měřidel a zkoušek

GPS matrix poukazuje na to, co je v současné době hotové a co je třeba teprve dodělat, neboť reprezentuje systém všech hotových norem pro mezinárodní použití. Je odhadováno, že v současné době je hotovo přibližně 50 % všech potřebných požadavků (norem). To znamená, že v brzké době budou uvedeny nové změny a normy a strojírenské podniky, které budou chtít dosahovat požadované kvality svých výrobků, budou muset přejít na nové normy uvedené v systému GPS matrix, aby mohly konkurovat ostatním mezinárodním firmám.

2.2. Geometrické tolerance [1], [2], [3], [6], [7], [16], [18], [19], [21], [22]

Na správné funkci výrobku a na jeho požadované kvalitě se podílí mimo jiné geometricky přesný tvar obrobku, který je dán geometrickými tolerancemi. Geometrické tolerance vyhraňují možnou přípustnou odchylku tvaru či poloh od jmenovitého tvaru či polohy tak, aby nedocházelo k poškození funkčnosti a kvality součásti. Geometrické tolerance předepisuje konstruktér pouze tehdy, je-li to nutné z hlediska funkčnosti součásti. Tyto předepsané tolerance se mohou vztahovat k jednomu či dvěma a více prvkům. Nicméně konstruktér by měl mít neustále na paměti, že výroba pomocí předepsaných geometrických tolerancí je mnohem přesnější než výroba stejné součásti, které je tolerována pomocí tolerancí rozměrových.

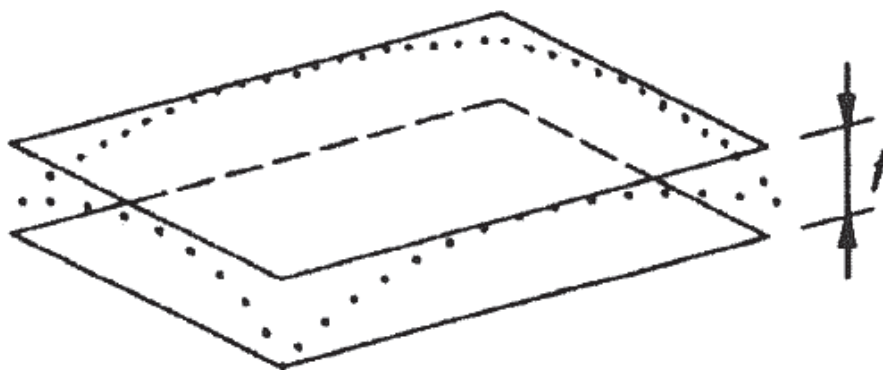
2.2.1. Toleranční pole [1], [2], [7]

K pochopení geometrických tolerancí je nutné upřesnit si, co to je toleranční pole. Geometrické tolerance, které aplikujeme na daný prvek součásti, definují toleranční pole, ve kterém daný prvek, ať už je jím osa, rovina souměrnosti, či plocha, musí ležet. V závislosti na charakteristice tolerování a v závislosti na uvádění ve výkresech se toleranční pole dělí následovně:

- Oblast uvnitř kruhu
- Oblast mezi dvěma soustřednými kružnicemi
- Oblast mezi dvěma stejně vzdálenými čarami nebo mezi dvěma rovnoběžnými přímkami
- Oblast v kouli
- Oblast ve válci

- Oblast mezi dvěma sousými válci
- Oblast mezi dvěma stejně vzdálenými profily stěn nebo dvěma rovnoběžnými rovinami
- Oblast uvnitř hranolu

Na obrázku 2 je ukázáno toleranční pole, které je limitováno dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o rozměr „t“.



Obrázek 2 - Ukázka tolerančního pole [15]

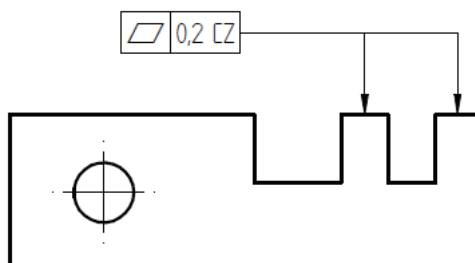
Jestliže toleranční hodnotě předchází symbol „ \varnothing “, toleranční pole je válcové nebo kruhové. Když znak „ \varnothing “ není uveden, je toleranční zóna ohraničena dvěma křivkami (například přímkami, kružnicemi), nebo dvěma plochami (například roviny, válce, hranoly). Pro případ, že je toleranční zóna kulová, označuje se „ $S\varnothing$ “.

Toleranční pole je umístěno centrálně, souose nebo symetricky, s ohledem na teoreticky přesné umístění.

Hraniční čáry tolerančního pole jsou stejně vzdáleny od jmenovitého tvaru a tvar tolerančního pole není závislý na rozměru (průměr, vzdálenost) prvku.

Délka tolerančního pole, pokud není uvedeno jinak, platí po celé délce nebo povrchu prvku. Pokud je v rámečku hodnota s lomítkem, například 0,05/100, znamená to, že na délce 100 mm platí geometrická tolerance o velikosti tolerančního pole 0,05.

Jestliže prvek obsahuje společné toleranční pole, značí se písmeny CZ (zkratka „common zone“) za hodnotou v tolerančním rámečku.

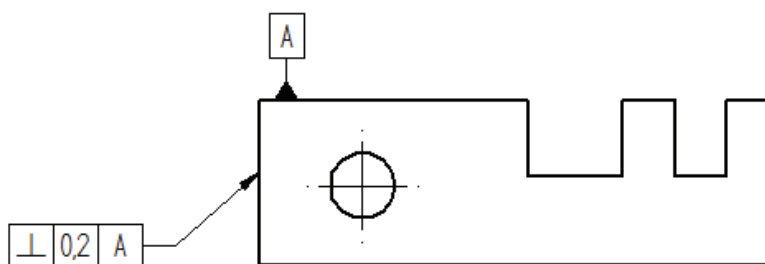


Obrázek 3 - Požadavek na společné toleranční pole [15]

Předepisování tolerancí tvarů, čar a povrchů jednotlivých prvků by mělo být základní myšlenkou každého konstruktéra, při tvorbě výrobní dokumentace, aby bylo možné plnit cíl každého podniku se strojním zaměřením, čímž je vyrábět a exportovat výrobky v požadované přesnosti a kvalitě.

2.2.2. Toleranční rámeček [1], [2], [3], [7]

Požadovaná tolerance se zapisují do obdélníkového rámečku, který je rozdělen na 2 a více polí. První políčko náleží značce dané geometrické tolerance, do druhého políčka se zapisuje velikost tolerančního pole v mm. Pokud se tolerance vztahuje k základně, třetí políčko vyplní velké tiskací písmeno značící příslušnou základnu. Toleranční rámeček je spojen odkazovou čarou zakončenou šipkou, která je spojená s tolerovaným prvkem.

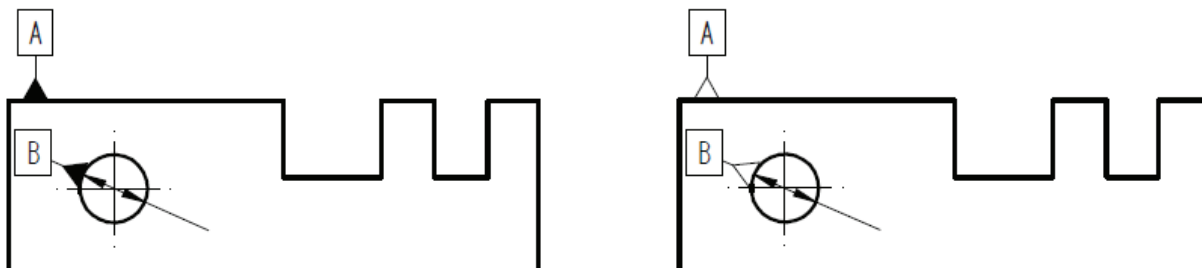


Obrázek 4 - Toleranční rámeček [15]

2.2.3. Základny [1], [2], [3], [7]

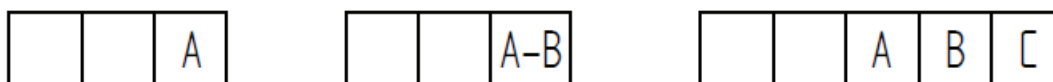
Pro předepisování geometrických tolerancí (s výjimkou tolerancí tvarových, popřípadě tolerance polohy či tvaru profilu a plochy) musí konstruktér ve výkresové dokumentaci označit prvek, ke kterému se daná geometrická tolerance vztahuje. Například pro kolmost dvou rovin se musí předepsat, ke které rovině se kolmost uvažované roviny vztahuje. Základnou je teoreticky přesný prvek, jako je například osa, přímka, rovina, či bod a definuje umístění a orientaci tolerančního pole. Základna se značí rovnostranným plným či prázdným trojúhelníkem. Pomocí odkazové čáry je trojúhelník spojen s rámečkem, ve kterém je napsáno označení základny pomocí velkého písmene. Oba dva způsoby jsou ukázány na obrázku 5.

Při předepisování základny je důležité, aby si konstruktér uvědomil, ke kterému prvku se základna vztahuje, jelikož je rozdíl, zda základna leží proti kótě průměru, nebo na ploše součásti. V prvním případě tvoří základnu osa prvku (na obrázku 5 základna B), v případě druhém tvoří základnu plocha, na níž je základna umístěna (na obrázku 5 základna A).



Obrázek 5 - Označení základny [15]

Pokud tvoří základnu pouze jeden prvek, je v tolerančním rámečku uvedené pouze jedno velké písmeno značící danou základnu. Společná základna je označována dvěma velkými písmeny oddělenými pomlčkou. Jestliže je soustava základen určena dvěma nebo třemi prvky, musí být stanoveny jejich priority. Značky základen se v tomto případě zapisují do samostatných políček v rámečku zprava doleva, ve stejném pořadí klesá prioritita daných základen.



Obrázek 6 - Příklady zápisu základen [15]

2.2.4. Rozdělení geometrických tolerancí [1], [3], [6], [22]

Z důvodu určování tolerancí se obrobek považuje za složený z jednotlivých prvků (geometrických elementů), jako jsou roviny, válce, kužele, či koule. Z těchto náhradních elementů jsou geometrické tolerance obrobků, neboli strojních částí, následně odvozeny. Jestliže jsou geometrické tolerance vztaženy právě k těmto jednotlivým výchozím prvkům, rozdělujeme geometrické tolerance do několika skupin, jak je ukázáno v tabulce 1.

Tabulka 1 - Rozdělení geometrických tolerancí [3]

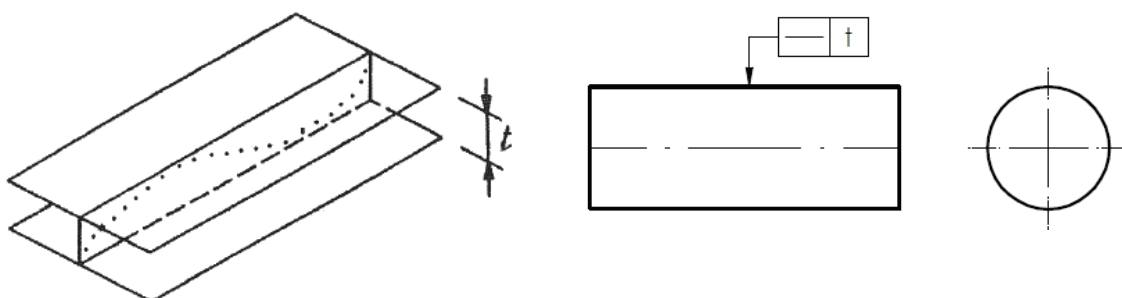
Tolerance	Charakteristika	Značka	Potřebnost základny
tvaru	přímost	—	ne
	rovinnost	▭	ne
	kruhovitost	○	ne
	válcovitost	∅	ne
	tvar profilu	∩	ne
	tvar povrchu	∪	ne
směru	rovnoběžnost	//	ano
	kolmost	⊥	ano
	sklon	∠	ano
umístění	poloha	⊕	ano nebo ne
	soustřednost a sousost	⊙	ano
	souměrnost	≡	ano
házení	kruhovému házení	↗	ano
	celkové házení	↗↘	ano

2.2.5. Geometrické tolerance tvaru [1], [2], [6], [7], [16]

Geometrické tolerance tvaru vyjadřují maximální hodnotu tvarové odchylky od základního, respektive jmenovitého tvaru. Norma ISO 1101 definuje tvarová toleranční pásma, neboli pole, v rozmezí kterých musí všechny body dané části obrobku ležet. V tomto tolerančním poli může mít prvek jakýkoliv tvar, záleží pouze na tom, aby žádným svým bodem nepřekročil normou určené rozmezí tolerančního pole. Hodnota tolerančního pole říká, jaké rozmezí, neboli jakou šířku tolerančního pole má. Obecně lze říci, že tvarové odchylky omezují odchylky prvků z geometricky ideálních čar a povrchů. Mezi tvarové odchylky čar patří přímota a kruhovitost a mezi základní tvarové odchylky povrchu se řadí tolerance rovinnosti a válcovitosti.

Přímota [1], [2], [6], [7]

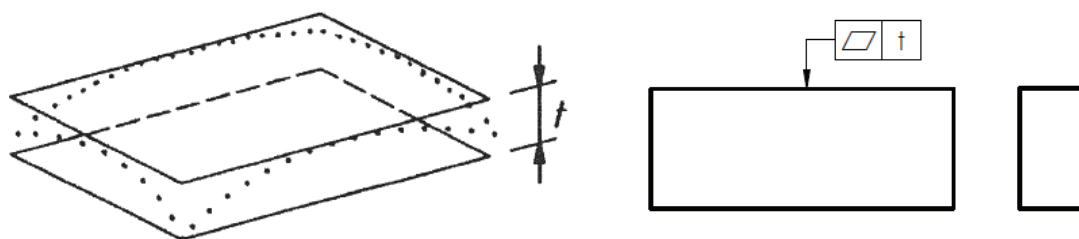
Čára je považována za přímou, jestliže v každé části rovnoběžné na rovinu promítání, ve které je značení ukázáno, je profil obsažen mezi dvěma rovnoběžnými čarami nebo rovinami vzdálenými od sebe o vzdálenost „t“, nebo v případě přímoty osy musí osa ležet ve válci o průměru „t“. Zvláštními případy, které mohou nastat, jsou vypuklost (konkávnost) nebo vydutost (konvexnost). Vypuklost znamená, že se vzdálenost bodů obrobku od obalové přímky zmenšuje od okrajů do středu. U vydutosti je tomu naopak, to znamená, že se vzdálenost bodů skutečného profilu obrobku zvětšuje od okrajů směrem do středu.



Obrázek 7 - Toleranční pole a předpis přímoty [15]

Rovinnost [1], [2], [6], [7], [16]

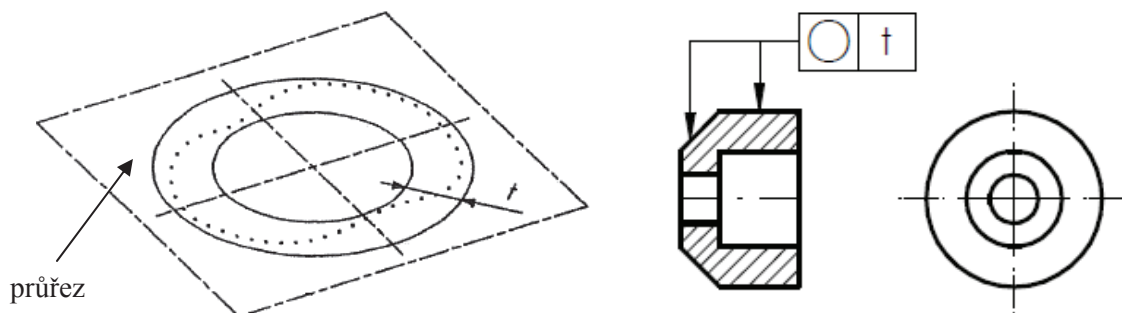
Profil tolerovaného prvku je považován za rovinný právě tehdy, když skutečný profil je obsažen mezi dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o předepsanou hodnotu. Opět zde mohou nastat dva zvláštní případy, jimiž jsou vypuklost (konkávnost) nebo vydutost (konvexnost). Vypuklost znamená, že se vzdálenost bodů obrobku od obalové roviny zmenšuje od okrajů do středu. U vydutosti je tomu naopak, to znamená, že se vzdálenost bodů skutečného profilu obrobku zvětšuje od okrajů směrem do středu. Geometrická tolerance rovinnosti je důležitá např. u lože soustruhu, aby nedocházelo k výrobě zmetků vlivem konvexnosti nebo konkávnosti plochy lože.



Obrázek 8 - Toleranční pole a předpis rovinnosti [15]

Kruhovitost [1], [2], [6], [7]

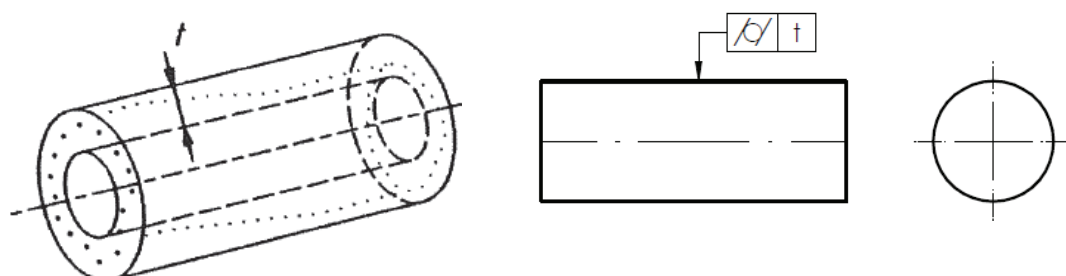
Kruhovitost určují dvě soustředné kružnice, mezi nimiž musí profil ležet v každém průřezu. Jedna z kružnic je kružnicí opsanou profilu, druhá kružnice je s ní soustředná a dotýká se povrchu. Mezi těmito kružnicemi volíme ty, které mají nejmenší možnou radiální vzdálenost, nejvýše je však radiální vzdálenost rovna předepsané vzdálenosti.



Obrázek 9 - Toleranční pole a předpis kruhovitosti [15]

Válcovitost [1], [2], [6], [7]

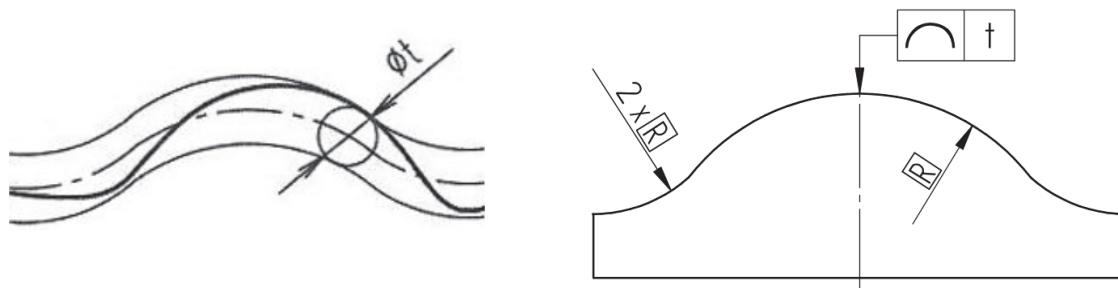
Profil tolerovaného prvku je považován za válcovitý, je-li skutečný profil obrobku vepsán do tolerančního pole. Tím jsou v tomto případě dva souosé válce o dané radiální vzdálenosti, přičemž rozměry těchto válců jsou co nejmenší. Jeden z válců je válcem obalovým a druhý válec se dotýká povrchu obrobku.



Obrázek 10 - Toleranční pole a předpis válcovitosti [15]

Tvar profilu [1], [2], [6], [7]

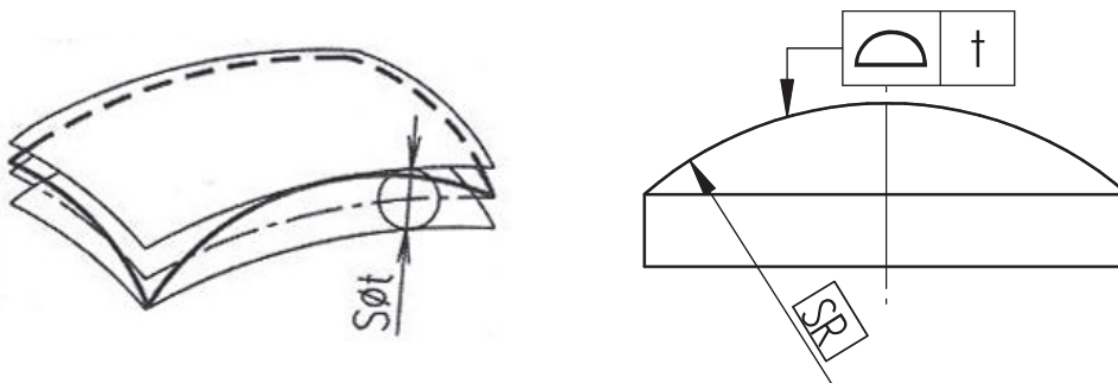
Jmenovitá (teoretická, geometricky ideální) čára je definována teoreticky přesnými rozměry (TEDs). V každé části rovnoběžné s rovinou promítání, ve které je značení zobrazeno, musí být čára profilu obsažena mezi dvěma ekvidistantními (stejně vzdálenými) čarami obalujícími kružnice o daném průměru, jejichž středy leží na čáře, která má jmenovitý (teoretický, geometricky ideální) tvar.



Obrázek 11 - Toleranční pole a předpis tvaru profilu [15]

Tvar plochy [1], [2], [6], [7]

Jmenovitý (teoretický, geometricky ideální) povrch je definován teoreticky přesnými rozměry (TEDs). Povrch musí být obsažen mezi dvěma ekvidistantními (stejně vzdálenými) povrchy obalujícími koule o daném průměru a jejichž střed leží na povrchu majícím jmenovitý (geometricky přesný) tvar.



Obrázek 12 - Toleranční pole a předpis tvaru plochy [15]

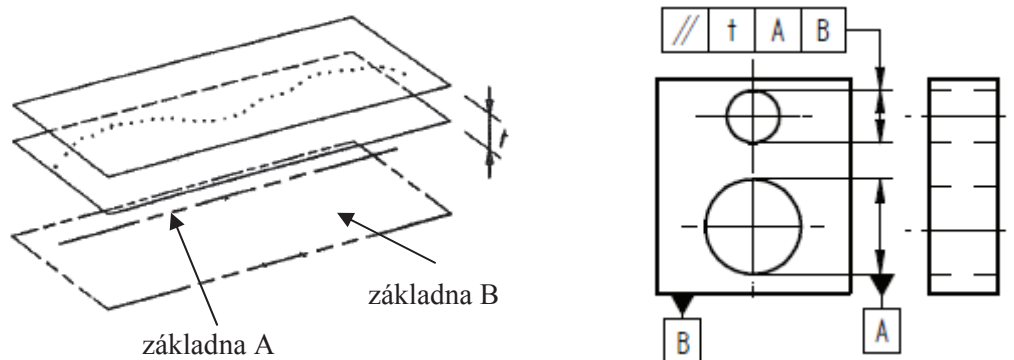
2.2.6. Geometrické tolerance směru [1], [2], [6], [7]

Tolerance směru jsou definovány normou ČSN ISO 1101 a patří mezi geometrické tolerance, které jsou závislé na předepsání jedné, respektive více základen. Obecně platí, že směr tolerančního pole tolerovaného prvku a šířka tohoto pole je předepsána geometrickou tolerancí směru. Geometrické tolerance směru bývají většinou předepsány ve vztahu k jedné základně, v některých případech jsou předepsány základny dvě, což se vztahuje například k případům, kdy tolerovaný prvek součásti má vztah k dvěma různým plochám, které jsou vyrobeny operací soustružení s nutností otočení a přepnutí součásti pro správnou výrobu součásti.

Zjednodušeně lze říci, že pro geometrické tolerance směru by mohla být předepsána pouze tolerance sklonu, která by říkala, zda je sklon 90° , 0° nebo zda je hodnota úhlu jiná. Z praktického hlediska se však využívají 3 rozdílné značky, které určují, zda se jedná o geometrickou toleranci rovnoběžnosti, kolmosti, či sklonu. Tyto tři případy jsou popsány v následujících řádcích.

Rovnoběžnost [1], [2], [6], [7]

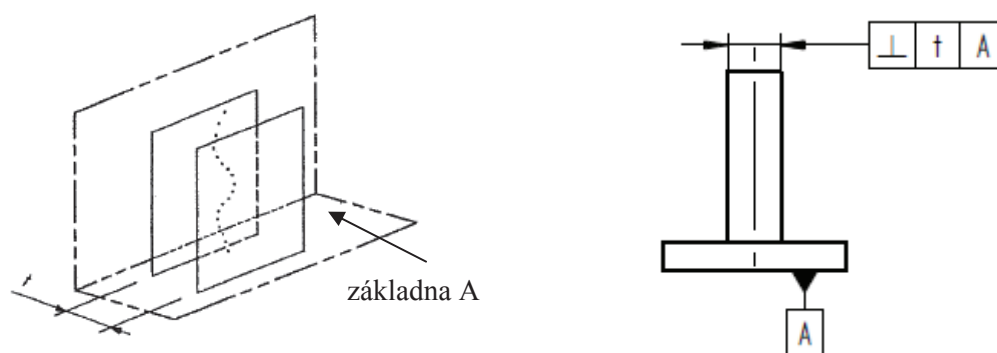
Skutečný povrch musí být obsažen mezi dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o uvedenou hodnotu. Roviny tvořící toleranční pole musí být rovnoběžné se základním prvkem.



Obrázek 13 - Toleranční pole a předpis rovnoběžnosti [15]

Kolmost [1], [2], [6], [7]

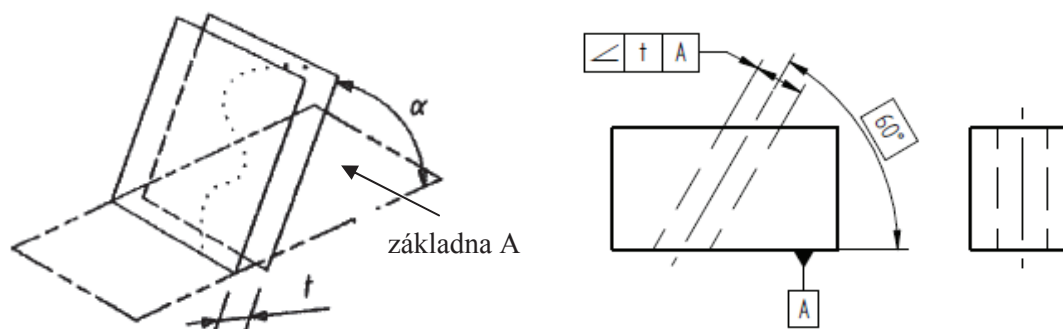
Zjištěný povrch se musí nacházet mezi dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o danou hodnotu v tolerančním rámečku. Tyto dvě roviny musí být kolmé k výchozímu prvku.



Obrázek 14 - Toleranční pole a předpis kolmosti [15]

Sklon [1], [2], [6], [7]

Posuzovaný prvek musí být obsažen mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, jejichž vzájemná vzdálenost je uvedena v tolerančním rámečku. Tyto roviny jsou vzájemně rovnoběžné a jsou nakloněné vzhledem k základně o teoreticky přesný úhel.



Obrázek 15 - Toleranční pole a předpis sklonu [15]

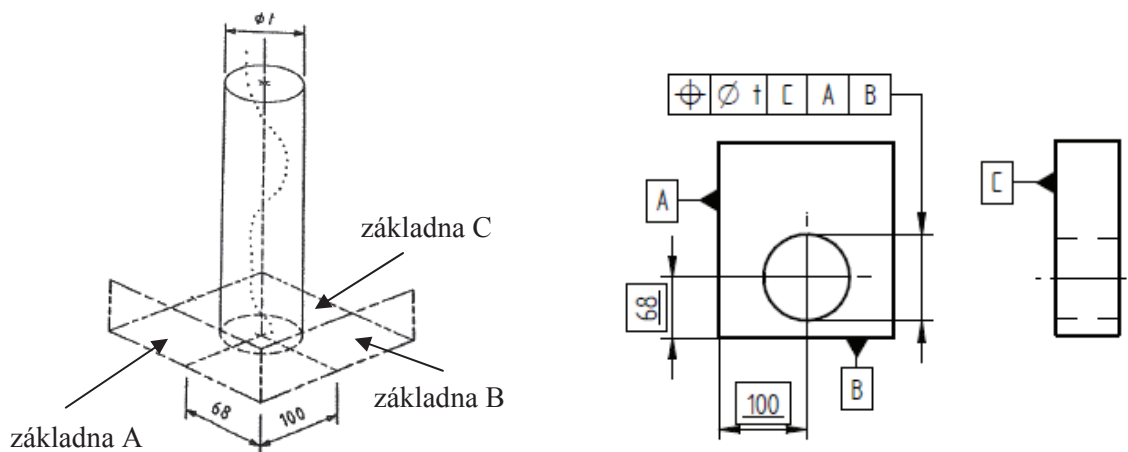
2.2.7. Geometrické tolerance umístění [1], [2], [6], [7]

Tolerance umístění jsou definovány normou ČSN ISO 1101 a stejně jako tolerance směru patří mezi geometrické tolerance, pro které je nutné předepisovat základnu, respektive základny. Geometrická tolerance umístění určuje, kde se dané toleranční pole tolerovaného prvku nachází a udává velikost tolerančního pole. Do skupiny geometrických tolerancí umístění patří geometrické tolerance soustřednosti a sousosti, souměrnosti a polohy.

Tolerance umístění jsou v praxi velice využívané. Jejich využití spadá také například do oblasti obráběcích nástrojů. Například geometrická tolerance sousosti je předepisována na jednotlivé rotační součásti soustruhu (vřeteno, otočný hrot, koník), neboť jinak by docházelo k nesymetrickému obrábění a tím k výrobě vadných součástí (zmetků).

Poloha [1], [2], [6], [7]

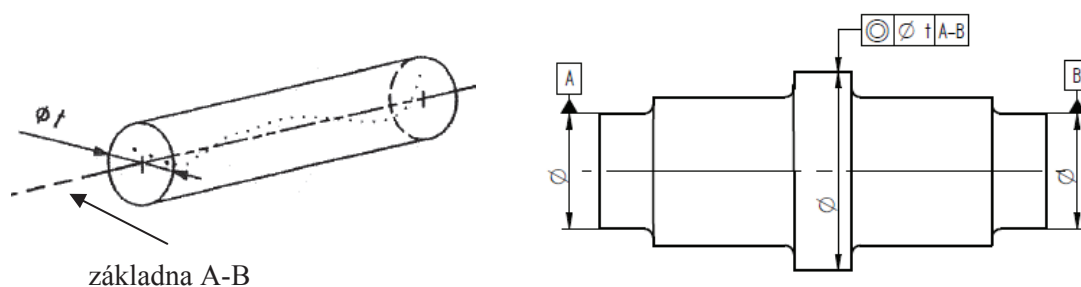
Teoreticky přesná (jmenovitá) pozice je definována teoreticky přesnými rozměry (TEDs) s ohledem na výchozí základny. Skutečná osa musí být obsažena ve válci o daném průměru. Osa tohoto válce je shodná s teoreticky přesnou pozicí.



Obrázek 16 - Toleranční pole a předpis umístění [15]

Souosost a soustřednost [1], [2], [6], [7]

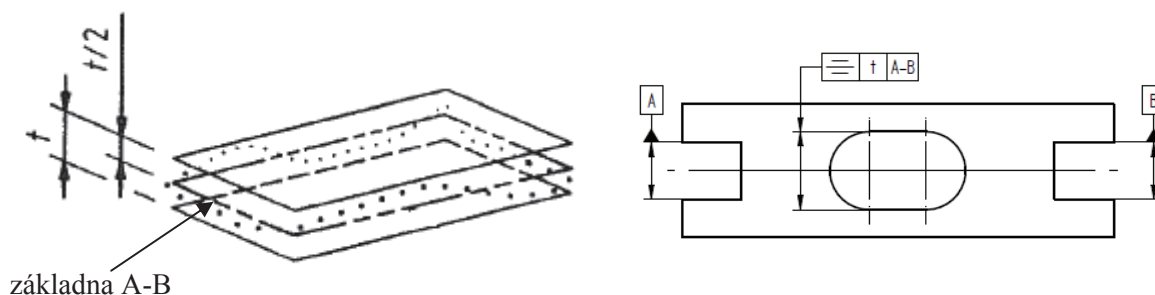
Skutečná osa prvku musí být obsažena ve válci o předepsaném průměru. Tento válec je souosý s výchozím prvkem (základnou). Když jsou prvky prakticky pouze dvojrozměrné (například tenké plechy nebo rytiny), tolerance jsou odkazovány jako tolerance soustřednosti.



Obrázek 17 - Toleranční pole a předpis souososti [15]

Souměrnost [1], [2], [6], [7]

Zjištěný (naměřený) střední povrch musí být obsažen mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdálené o uvedenou hodnotu. Tyto roviny musí být symetricky uspořádány k výchozí střední rovině (k základně).



Obrázek 18 - Toleranční pole a předpis souměrnosti [15]

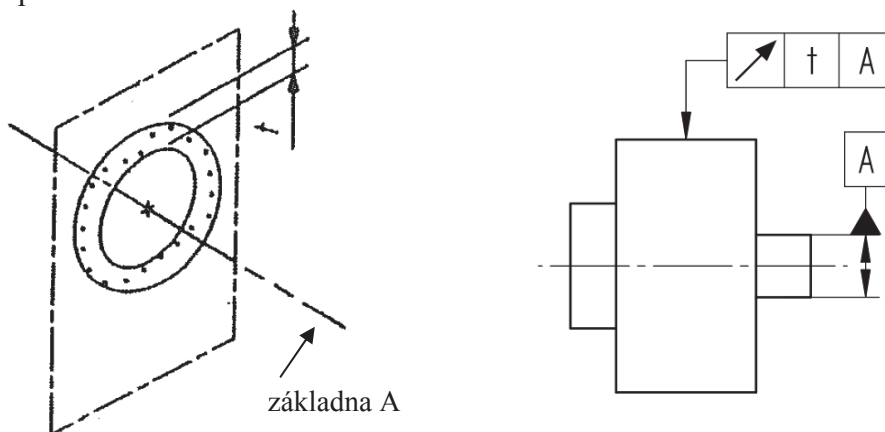
2.2.8. Geometrické tolerance házení [1], [2], [6], [7]

Tolerance házení jsou definovány normou ČSN ISO 1101. Tolerance házení nezahrnuje pouze tvar plochy, ale i polohu bodů tolerovaného prvku vzhledem k základnímu prvku. Tato speciální geometrická tolerance zahrnuje toleranci souososti, válcovitosti a kolmosti. Házení lze rozdělit na házení kruhové (obvodové a čelní) a házení celkové (obvodové a čelní). Geometrické tolerance házení se předepisují na rotační součásti, například na otočný hrot soustruhu.

Kruhové házení [1], [2], [6], [7]

- Kruhové obvodové házení

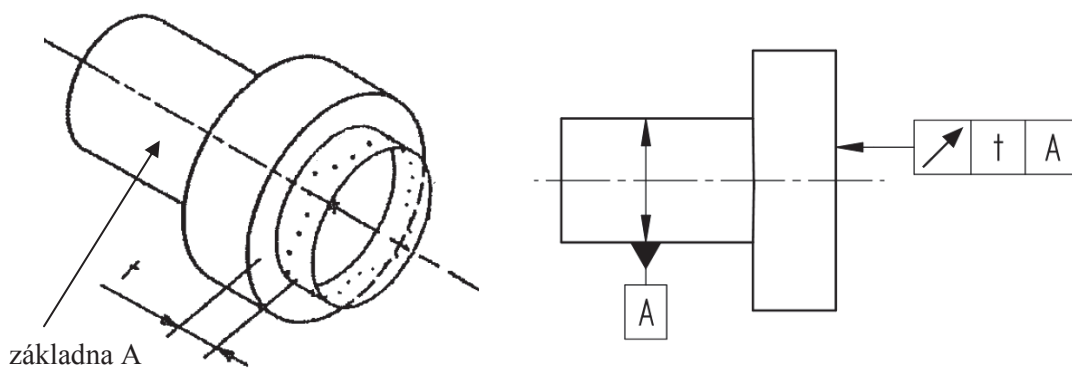
Kruhové házení ošetřuje úchylku kruhovitosti a soustřednosti. Tolerovaný prvek musí ležet mezi dvěma soustřednými kružnicemi vzdálenými od sebe o hodnotu „ t “, se středy na základním prvku.



Obrázek 19 - Toleranční pole a předpis kruhového obvodového házení [15]

- Kruhové čelní házení

Čelním házením se projevuje vzdálenost bodů ležících na průřezu čelní plochy s válcovou plochou řezu od jmenovité roviny společně s úchylkou kolmosti čela k základně. Toleranční pole je limitováno dvěma kruhovými plochami vzdálenými od sebe o vzdálenost „ t “, se středy na základním prvku.

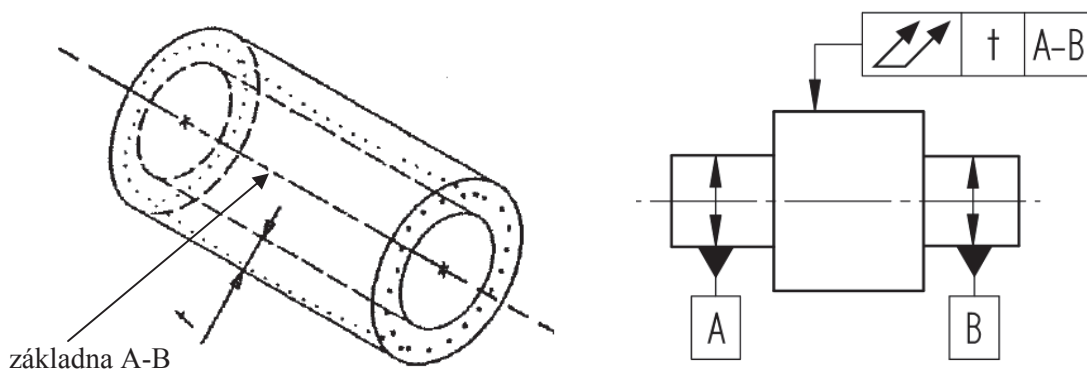


Obrázek 20 - Toleranční pole a předpis kruhového čelního házení [15]

Celkové házení [1], [2], [6], [7]

- Celkové obvodové házení

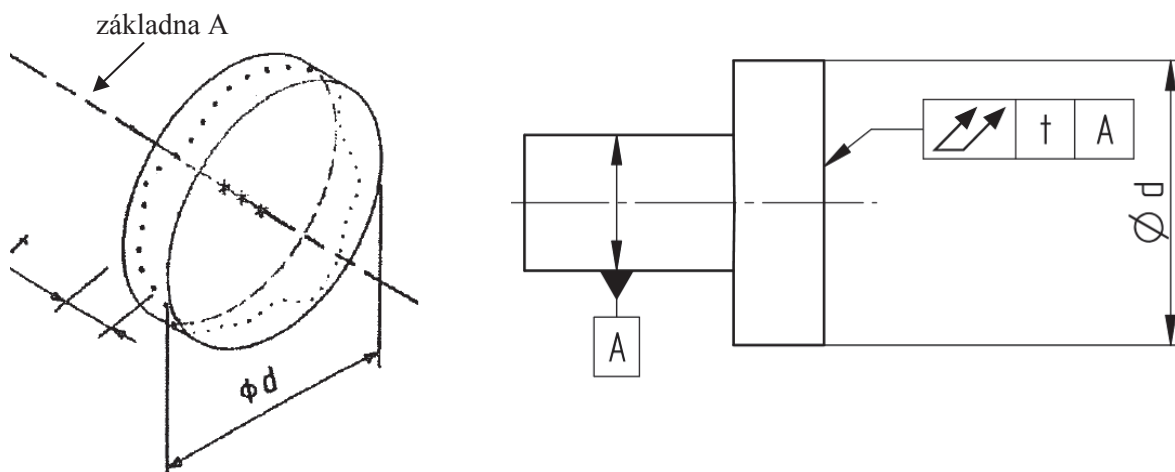
Tolerancí celkového házení se projevuje úchylka válcovitosti společně s úchytkou souososti daného prvku. Toleranční pole tvoří oblast omezená dvěma válci, jejichž osa je totožná se základní osou a jejichž vzdálenost je udána hodnotou „t“. Tato geometrická tolerance se předepisuje pouze pro válcové plochy.



Obrázek 21 - Toleranční pole a předpis celkového obvodového házení [15]

- Celkové čelní házení

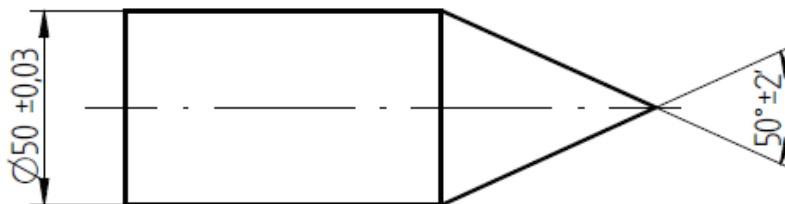
Touto geometrickou tolerancí se ošetřuje úchylka rovinnosti plochy společně s kolmostí k základní ose. Toleranční zónu tvoří oblast mezi dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu „t“ a jsou kolmé k základní ose. Tolerance celkového čelního házení se předepisuje pouze u čel rotačních součástí.



Obrázek 22 - Toleranční pole a předpis celkového čelního házení [15]

2.3. Rozměrové tolerance [1], [2], [18], [19], [21]

Mezní úchytky délkových rozměrů neboli rozměrové tolerance určují pouze skutečné místní rozměry prvku, nikoliv však úchytky tvarové. Odchytky délkových rozměrů musí být předepsány ve stejných jednotkách, jako je tomu u jmenovitého rozměru. Pro rozměrové tolerance úhlových rozměrů platí podobná pravidla, jako u tolerování délkových rozměrů. Při tolerování velikostí úhlů musí být uvedeny jednotky jmenovitého rozměru i případných úchylek. Jelikož jsou rozměrové tolerance předepisovány k jmenovitým (přesným) tvarům součástí, musí být rozměrové tolerance (dédkové i úhlové) pro zajištění správného tvaru součástí doplněny o vhodné tolerance geometrické.



Obrázek 23 - Rozměrové tolerance

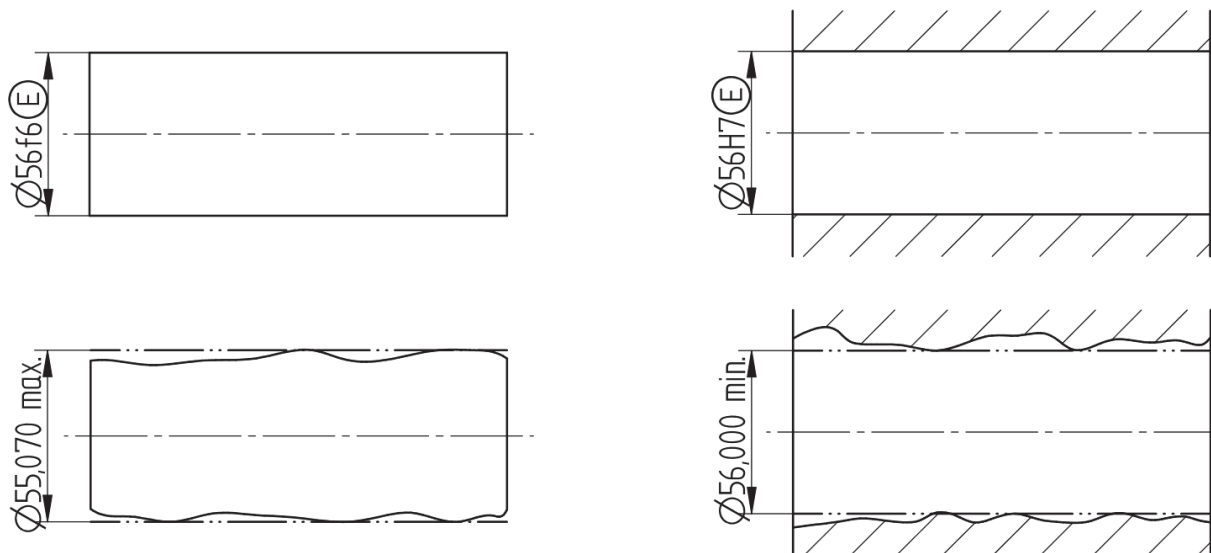
2.4. Závislé tolerance [1], [2], [6], [10], [22]

Základním pravidlem tolerování je pravidlo nezávislosti. Toto pravidlo říká, že musí být posuzovány nezávisle (není-li uvedeno jinak) následující údaje součásti: délkové rozměry s mezními úchytkami, úhlové rozměry s mezními úchytkami, geometrické tolerance. Vzájemná závislost může být předepsána například předpisem požadavku kontroly obalové plochy, požadavku maxima materiálu, minima materiálu nebo předpisem požadavku reciprocity.

2.4.1. Podmínka obalové plochy [1], [2], [10]

Požadavek kontroly obalové plochy je vhodné předepsat v tom případě, když dvě součásti (s válcovými nebo rovinnými plochami) budou tvořit uložení. Tento požadavek se značí písmenem E v kroužku a uvádí se za rozměr prvku. Tato značka určuje závislost mezi rozměrem a tvarem. To znamená, že při rozměru prvku na mezi maxima materiálu musí být dodržen geometricky správný tvar prvku.

Na obrázku 24 je ukázán hřídel a díra s požadavkem kontroly obalové plochy. Tolerovaný hřídel (vlevo) musí ležet uvnitř obalové plochy geometricky přesného tvaru o rozměru rovnému horní mezní úchylce tolerovaného prvku, která je pro uložení $\varnothing 56f6$ ($\varnothing 56_{-0,049}^{-0,030}$) rovna 55,070 mm. Obalový válec geometricky přesného tvaru vepsaný skutečné díře nesmí mít průměr menší než je předepsaný dolní mezní rozměr. Pro uložení $\varnothing 56H7$ ($\varnothing 56_{+0,000}^{+0,030}$) je dolní mezní rozměr díry roven 56,000 mm. Horní mezní rozměr díry však nesmí překročit předepsaný horní mezní rozměr (56,030 mm)

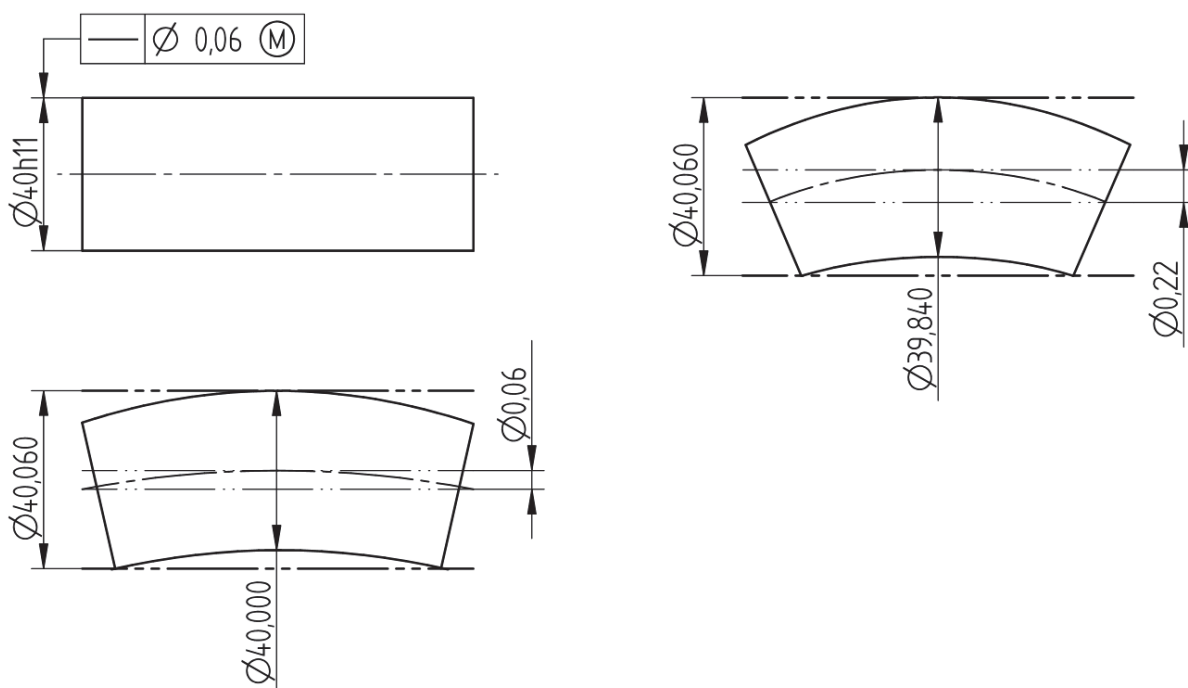


Obrázek 24 - Předpis požadavku kontroly obalovou plochou [1]

2.4.2. Podmínka maxima materiálu [1], [2], [10]

Další možností závislosti mezi geometrickými a rozměrovými tolerancemi je podmínka maxima materiálu. Jsou-li při montáži spojované prvky současně na maximu materiálu (u díry dolní mezní hodnota, u hřídele horní mezní hodnota), vzniká mezi nimi minimální vůle, a proto musí být dodrženy předepsané geometrické tolerance. Jestliže skutečné rozměry nedosahují maxima materiálu, je možné zvětšit geometrickou toleranci. Podmínka maxima materiálu se označuje písmenem M v kroužku za hodnotou tolerance.

Obrázek 25 znázorňuje předepsání přímosti osy válce s $\varnothing 40h11$ ($\varnothing 40_{-0,160}^{+0,000}$) v závislosti na podmínce maxima materiálu. Správný tvar a rozměr tohoto válce lze kontrolovat pomocí virtuálního válce (vlevo dole), jehož průměr je roven součtu horního mezního rozměru hřídele a velikosti geometrické tolerance $40,00 + 0,06 = 40,06$ mm. Pokud bude rozměr válce na dolním mezním rozměru $39,840$ mm, je možno zvětšit velikost tolerančního pole přímosti osy o rozdíl mezi horním a dolním mezním, rozměrem hřídele, to znamená $0,06 + 0,160 = 0,22$ mm. Tento případ je znázorněn na obrázku 25 vpravo nahoře.

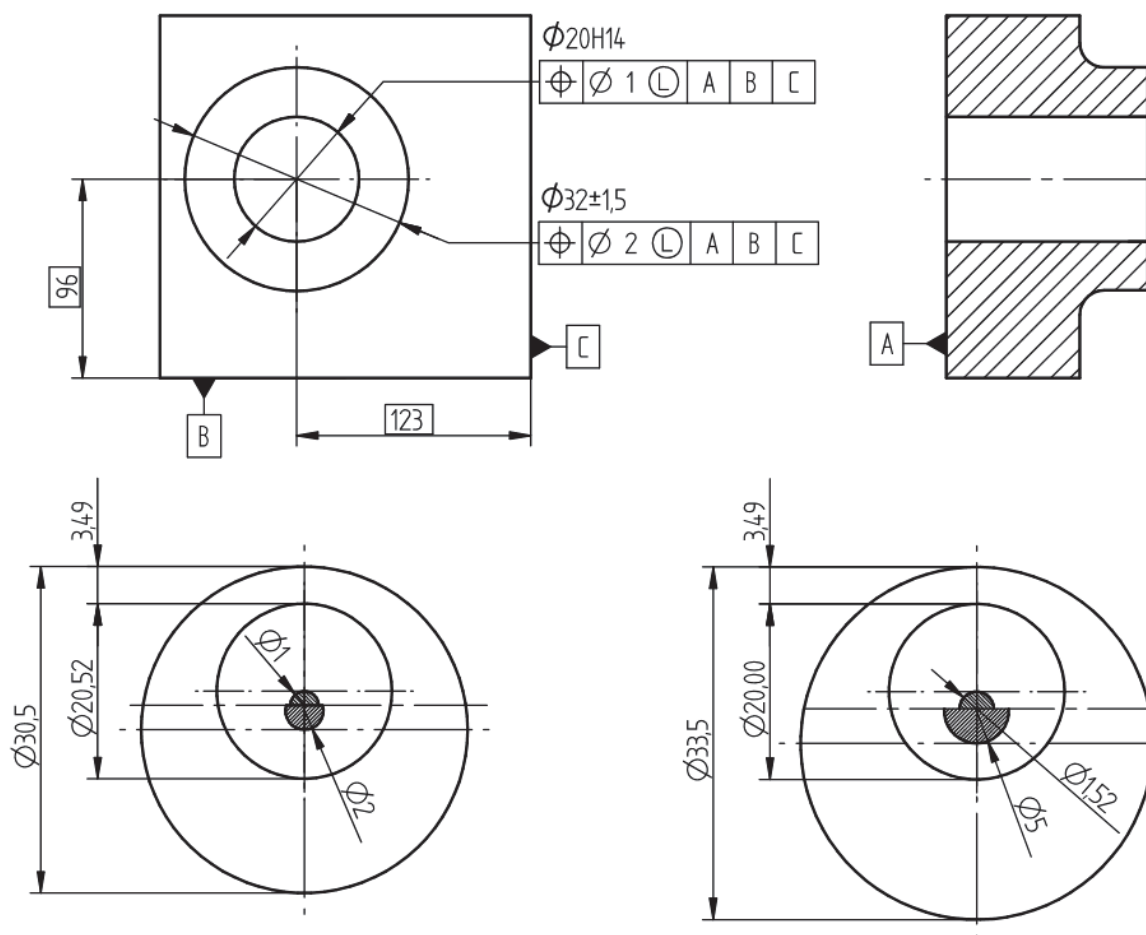


Obrázek 25 - Předpis podmínky maxima materiálu [1]

2.4.3. Podmínka minima materiálu [1], [2], [10]

Na stejném principu jako podmínka maxima materiálu funguje i podmínka minima materiálu. V případě podmínky minima materiálu musí být rozměr geometrické tolerance (tolerančního pole) dodržen tehdy, bude-li skutečný rozměr prvku na minimu materiálu (u díry horní mezní hodnota, u hřídele dolní mezní hodnota). Velikost tolerančního pole může být zvětšena o rozdíl mezi skutečným rozměrem a rozměrem minima materiálu. Podmínka minima materiálu se značí písmenem L v kroužku a stejně jako podmínka maxima materiálu se zapisuje za hodnotu geometrické tolerance.

Obrázek 26 zobrazuje náliček s vyvrtanou dírou, kde je předepsána tolerance umístění osy náličku a tolerance osy vyvrtané díry. Rozměr tolerančního pole musí být dodržen právě tehdy, když budou rozměry náličku a díry na minimu materiálu (obrázek 26 vlevo dole). Na obrázku 26 vpravo dole je znázorněn opačný případ, a to ten, že oba prvky jsou na maximum materiálu. V tomto případě je možné zvětšit obě toleranční pole o rozdíl mezi hodnotami na minimu materiálu a maximum materiálu jednotlivých prvků.

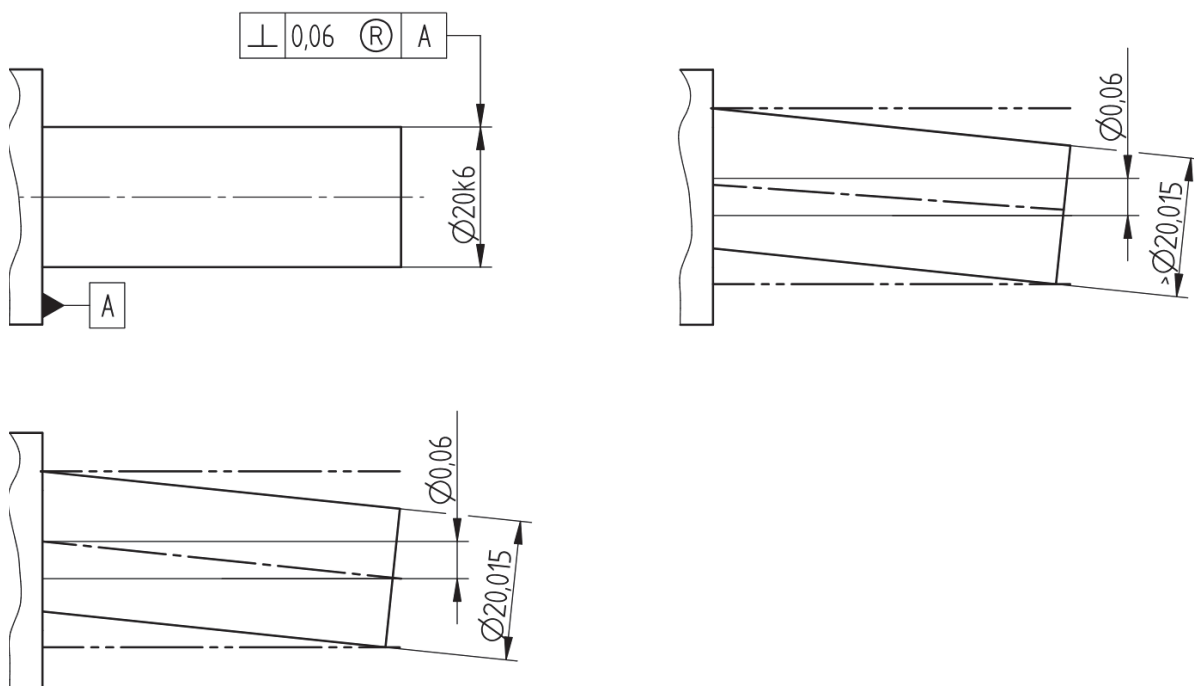


Obrázek 26 - Podmínka minima materiálu [1]

2.4.4. Podmínka reciprocity [1], [2], [10]

Tato podmínka dovozuje změnu rozměrové tolerance v závislosti na skutečné geometrické úchylice. Jakmile totiž není využita celá hodnota tolerančního pole, lze poté překročit horní mezní úchytku rozměrové tolerance až o celou nevyužitou hodnotu tolerance geometrické. Požadavek reciprocity se značí písmenem R v kroužku a zapisuje se za hodnotu rozměrové či geometrické tolerance.

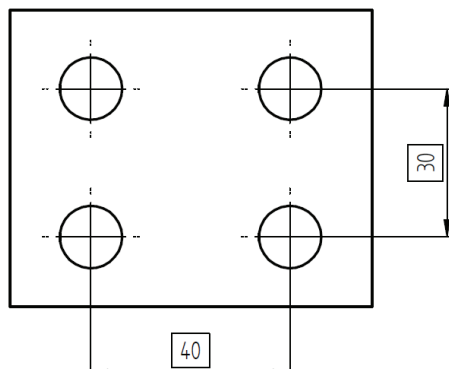
Na obrázku 27 (vlevo nahoře) je znázorněn předpis kolmosti osy čepu $\varnothing 20k6$ ($\varnothing 20_{+0,002}^{+0,015}$) k rovinnému čelu (základna A). Na totožném obrázku (vlevo dole) je znázorněné využití celého tolerančního pole kolmosti. Podmínka reciprocity dovozuje zvětšení horního mezního rozměru čepu o hodnotu velikosti nevyužitého tolerančního pole (obrázek 27 vpravo nahoře). Při perfektně kolmé ose je možné zvětšit horní mezní rozměr čepu až o celou toleranci kolmosti, tedy $20,015 + 0,06 = 20,075$ mm.



Obrázek 27 - Předpis požadavku reciprocity [1]

2.5. Teoreticky přesné rozměry (TEDs) [1], [2]

Teoreticky přesný rozměr je možné si představit jako rozměr s tolerancí, která konverguje (blíží se) k nule. Pojem teoreticky přesný rozměr (TED) určuje jednoznačně místo, kde se daný prvek na součásti musí nacházet. Měl by být použit při předepisování tolerance teoreticky přesného umístění prvku, pro tolerance polohy, profilu čáry a profilu povrchu. Tento rozměr se udává v obdélníkovém rámečku. Způsob tolerování pomocí TEDs umožňuje také jasně stanovit odkaz na jednu, dvě nebo tři základny.



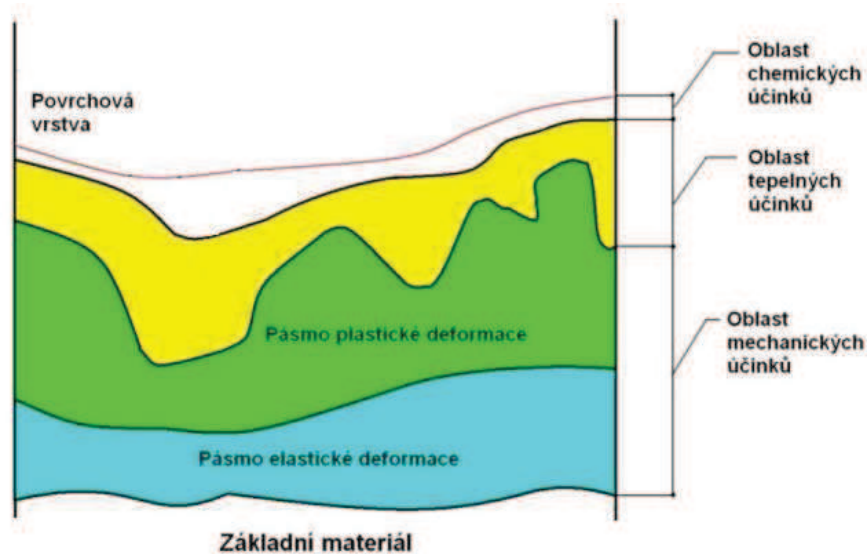
Obrázek 28 - Teoreticky přesné rozměry [2]

2.6. Textura povrchu [2], [7], [11], [12], [13]

Kromě přesných rozměrů a geometricky přesného tvaru součásti se na správné funkci výrobku a na jeho požadované kvalitě podílí také struktura povrchu obrobku.

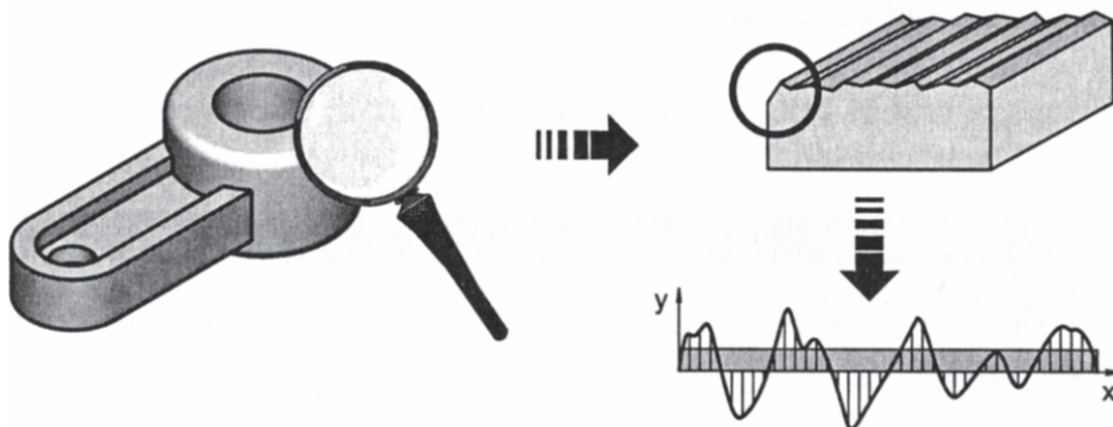
Pokud se ve strojírenských podnicích mluví o povrchu strojních součástí, většinou je myšlena pouze drsnost povrchu vyjádřená parametrem R_a – střední aritmetickou odchylkou povrchu součásti. Nicméně tento pohled na povrch není příliš vhodný. Neustále bychom měli mít na paměti, že není možné posuzovat povrch součástí podle jednotlivých vlastností (např. podle parametru R_a), ale že bychom měli na povrch součásti pohlížet jako celek neboli integritu povrchu.

Pod pojmem integrita povrchu si je možné představit souhrn všech charakteristik (vlastností), které mají vliv na povrch součásti. Během opracování materiálu vzniká elastická, popřípadě plastická deformace. S opracováním materiálů (např. tváření, obrábění nebo dokončovací metody) souvisejí také zbytková napětí, která se mohou uvolnit za pomoci plastické deformace nebo trhliny. Uvolnění zbytkových napětí plastickou deformací je lepší cesta i přes změnu výsledného povrchu součásti. Dalšími negativními vlivy působícími na povrch strojních součástí a součásti obecně mohou být vlivy chemické (např. oxidace nebo korozní účinky) nebo vlivy samotného materiálu (např. tvrdost, pevnost, houževnatost). Na obrázku 29 je ukázáno znázornění jednotlivých negativních účinků na povrch strojních součástí.



Obrázek 29 - Negativní účinky na povrch součásti [12]

V praxi není možné vyrobit součásti s dokonalým povrchem. Povrch součásti se vždy více či méně odlišuje od ideálního (geometricky přesného) povrchu, jehož tvar a rozměry jsou předepsány výrobní dokumentací. Odlišnost skutečného povrchu od povrchu ideálního se v praxi označuje termínem drsnost povrchu.



Obrázek 30 - Skutečný povrch výrobku [13]

Drsnost ploch, která se předepisuje na výkresovou dokumentaci, se vždy volí s ohledem na funkční vlastnosti daného povrchu. Z hlediska funkčnosti součásti se její plochy rozlišují na plochy stykové a plochy volné.

Pod pojmem stykové plochy se v praxi rozumí plochy dvou různých součástí, které budou v následné sestavě ve vzájemném styku (např. dělicí plocha mezi horní a dolní skříní jednostupňové převodovky). Plochy volné jsou plochy, které se v sestavě nedotýkají jiné plochy (např. vnější povrch víka elektromotoru).

Pro hodnocení drsnosti povrchu součástí existuje celá řada parametrů. Některé z těchto parametrů jsou ukázány v tabulce 2, nicméně ve většině strojírenských podniků se stále hovoří pouze o parametru střední aritmetické odchylky povrchu, která je však pro hodnocení drsnosti povrchu nevyhovující, neboť vyjadřuje pouze střední aritmetickou hodnotu, neukazuje však hodnoty nejvyšších a nejnižších bodů (výstupků a prohlubní). Pro předepisování na výkresovou dokumentaci se však využívá většinou parametr R_a .

Tabulka 2 ukazuje možné parametry pro hodnocení povrchu (písmeno R vyjadřuje profil drsnosti, W vyjadřuje profil vlnitosti a P vyjadřuje základní profil povrchu).

Tabulka 2 - Parametry pro hodnocení povrchu [7]

Parametry struktury povrchu			Gaussův filtr ISO 11562		
			R	W	P
Výškové parametry	výstupků a prohlubní	největší výška výstupku	Rp	Wp	Pp
		největší hloubka prohlubně	Rv	Wv	Pv
		největší výška profilu	Rz	Wz	Pz
		průměrná výška profilu	Rc	Wc	Pc
		celková výška profilu	Rt	Wt	Pt
	průměrné hodnoty	průměrná aritmetická úchylka profilu	Ra	Wa	Pa
		průměrná kvadratická úchylka profilu	Rq	Wq	Pq
		šikmost profilu	Rsk	Wsk	Psk
		špičatost profilu	Rku	Wku	Pku
	Délkové parametry		průměrná šířka prvku profilu	Rsm	Wsm

Hodnota drsnosti výsledného povrchu je závislá na metodě výroby povrchu dané součásti a vždy by měla být pečlivě promyšlena funkčnost jednotlivých ploch a metoda jejich výroby, neboť vysoce kvalitní povrch je přímo úměrně spojen s vysokou cenou výroby. Možné dosažitelné hodnoty drsností pro dané výrobní metody jsou ukázány v tabulce 3.

Tabulka 3 - Dosahované drsnosti povrchu pro jednotlivé operace obrábění [7]

Ra v μm	Obrábění												
	Vrtání	Zahlubování	Podélné soustružení	Příčné soustružení	Čelní frézování	Obvodové frézování	Hobování	Svislé obrážení	Protahování	Vystružování	Zaškrabávání	Pilování	Otryskávání
0,1													
0,2													
0,4													
0,8													
1,6													
3,2													
6,3													
12,5													
25													

Hodnoty parametru drsnosti R_a se také odvíjí od rozsahu vyráběného povrchu. Tyto různé hodnoty jsou ukázány v tabulce 4 pro výrobní operaci vrtání, kde dochází při větším průměru a větší délce otvoru k větším drsnostem výsledného povrchu součásti, což může být způsobeno častějším vyjížděním nástroje za účelem vypláchnutí třísek.

Tabulka 4 - Dosahované drsnosti vrtání pro rozdílné průměry a délky otvorů [7]

Průměr vrtané díry v mm		Materiál							ostatní kovy
		Ocel							
		poměr: délka díry / průměr díry							
		přes - do (včetně)							
		- 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - a výše		
přes	do (včetně)	Dosažitelná drsnost R_a v μm							
	15	12,5					25	12,5	
15	35	25			50		12,5		
35	55	25			50		25		
55	70	25		50			25		
70	a výše	25	50				25		

Hodnoty parametru drsnosti R_a záleží také na stupni přesnosti IT (stupni lícování). Například pro otvor o průměru 8 mm je hodnota parametru drsnosti R_a 0,4 μm pro stupeň přesnosti IT6, ale pro stupeň přesnosti IT 14 je hodnota parametru drsnosti R_a 3,2 μm .

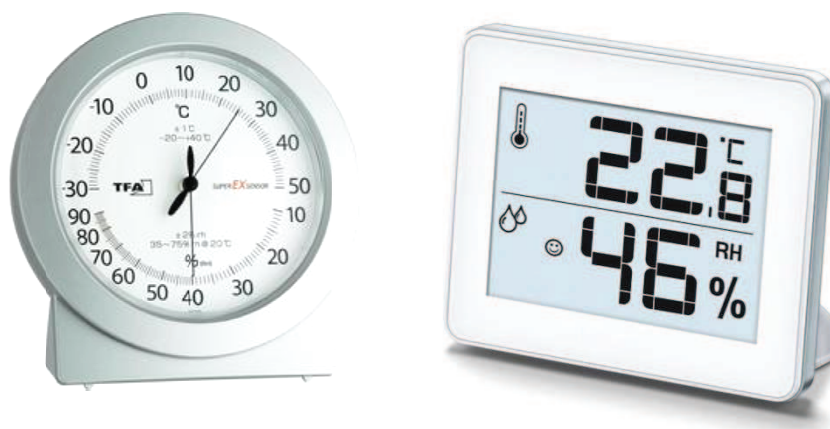
Z tohoto příkladu je vidět, že pro vyšší stupně přesnosti je hodnota R_a o několik tříd nižší, u větších průměrů otvorů je rozdíl v parametru drsnosti povrchu R_a ještě znatelnější, neboť u otvoru o průměru 350 mm je hodnota parametru drsnosti R_a 1,6 μm pro stupeň přesnosti IT6, ale pro stupeň přesnosti IT14 je hodnota parametru R_a 12,5 μm . Je tedy vidět, že přesnější, ale nákladnější výroba vede k lepším hodnotám parametru drsnosti R_a .

Z výše uvedeného je vidět, že je důležité správně zvolit metodu obrábění a pečlivě uvážit, jak přesně vyrobenou plochu (povrch) potřebujeme z hlediska její funkčnosti, neboť nesprávně zvolená kvalita (jakost) povrchu povede k cenově nákladné výrobě nebo k nevhodné součásti z hlediska funkčnosti. Je také důležité, aby konstruktér správně předepsal požadavek textury povrchu na výkresovou dokumentaci. Předepisování na výkresové dokumentaci musí být jednotné a přehledné a musí dodržovat předepsaná pravidla. Tyto pravidla jsou dány normou ČSN EN ISO 1302.

2.7. Nejistoty měření [14], [15], [19]

S předepisováním geometrických tolerancí a tolerancí obecně souvisí také následná kontrola rozměrů součásti v měřících laboratořích. I přes to, že výroba součásti proběhne podle předepsaných tolerancí a rozměrů uvedených na výkresové dokumentaci, nelze zapsat výsledek měření jedním číslem a říci, že tento výsledek je správný, neboť měření rozměrů (popřípadě jiných veličin) je ovlivněno nejistotami výsledku měření, které vyjadřují omezenou možnost znalosti hodnoty měřeného rozměru. Jevy, které přispívají k nejistotě měření a díky kterým nemůže být výsledek měření charakterizovaný pouze jedním číslem, jsou nazývány metrologickým pojmem „zdroje nejistot“. Mezi zdroje nejistot patří např.:

- Nekompletní definice měřené veličiny
- Nepřesné hodnoty měřících etalonů a referenčních materiálů
- Nepřesné hodnoty konstant a dalších parametrů získaných z externích zdrojů a použitých při výpočtu
- Vliv lidského faktoru při odečítání rozměru na analogovém měřidlu (např. chyba paralaxa)
- Nedostatečná znalost vlivů okolního prostředí nebo jejich nedokonalé měření (např. teplota nebo vlhkost v měřící laboratoři)



Obrázek 31 - Digitální a analogový přístroj pro měření vlhkosti a teploty vzduchu [14]

V České republice jsou pro oblast nejistot měření platné dokumenty EAL – Evropská spolupráce pro akreditaci laboratoří. Mezi tyto dokumenty patří:

- EAL – R2 – Vyjadřování nejistot měření při kalibracích, vydán v prosinci 1997
- EAL – R2 – S1 – vyjadřování nejistot měření při kalibracích – Příklady, vydán v červnu 1998
- EAL – G23 – Vyjadřování nejistot v kvantitativním zkoušení, vydán v říjnu 1996

Základním principem pro určování nejistot měření je princip statistický, který vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou se skutečně naměřená hodnota nachází v intervalu (rozsahu) hodnot vyjádřeném nejistotou měření.

Základní charakteristikou nejistoty měření je „standardní nejistota měření „ u “ vyjádřená hodnotou směrodatné odchylky, která určuje rozsah (interval) $< -u ; u >$ okolo naměřené hodnoty. Standardní nejistotu lze vyjádřit dvěma způsoby:

- V hodnotě naměřené veličiny – „Absolutní standardní nejistota měření“
- Poměrem absolutní nejistoty a hodnoty příslušné veličiny – „Relativní standardní nejistota měření“

Standardní nejistotu měření lze rozdělit podle způsobu jejího vyhodnocování:

- Standardní nejistota typu A - u_A
- Standardní nejistota typu B - u_B

Standardní nejistota typu A (značení této nejistoty je u_A) – stanovuje se statistickou analýzou ze série opakovaných měření stále stejné hodnoty za stále stejných podmínek (např. stálá teplota, tlak, vlhkost prostředí, stále stejný pracovník provádějící měření) a lze ji vyjádřit vztahem:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot k_A$$

kde: s – směrodatná odchylka

n – počet měření

k_A – koeficient určený v závislosti na počtu měření

Tabulka 5 - Hodnota koeficientu k_A v závislosti na počtu měření [14]

n	2	3	4	5	6	7	8	9	> 9
k_A	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

Standardní nejistota je charakteristická tím, že se zvyšujícím se počtem měření klesá, což plyne z výše uvedených hodnot koeficientu k_A .

Standardní nejistota typu B (značení této nejistoty je u_B) – jedná se o nejistotu vyjádřenou jinými postupy. Tyto nejistoty jsou způsobeny známými, popřípadě odhadnutelnými příčinami vzniku. Pro určení nejistoty typu B se nejdříve vytipují možné zdroje Z_1, Z_j, \dots, Z_m (např. nedokonalé měřicí zařízení, podmínky, za nichž měření probíhá). Následně se určí standardní nejistoty typu B pro každá zdroj (tyto nejistoty se stanovují odhadem a značí se

u_{zj}). Jednotlivé nejistoty u_{zj} se přepočítají na odpovídající složky nejistoty měřené veličiny $u_{x,zj}$ pomocí koeficientu $A_{x,zj}$:

$$u_{x,zj} = A_{x,zj} \cdot u_{zj}$$

Výsledná standardní nejistota typu B pro určitý zdroj se spočte jako:

$$u_{Bx} = \sqrt{\sum_{j=1}^m A_{x,zj}^2 + u_{zj}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{x,zj}^2}$$

V případě více zdrojů nejistot (známých nebo odhadnutelných) se výsledné standardní nejistoty od více zdrojů sečtou do výsledné standardní nejistoty typu B:

$$u_B^2 = u_{BE}^2 + u_{BM}^2 + u_{BT}^2$$

kde: u_{BE} – nejistota etalonu

u_{BM} – nejistota měřidla

u_{BT} – nejistota vlivem teploty

V praxi se vyžaduje a preferuje nejistota měření vyjádřená pouze jedinou hodnotou. Za tímto účelem se standardní nejistota typu A „ u_A “ a standardní nejistota typu B „ u_B “ slučují do kombinované standardní nejistoty „ u “, která udává interval (rozsah) hodnot, ve kterém se s velkou pravděpodobností skutečná hodnota vyskytuje.

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Jelikož se však v praxi vyžaduje vysoká pravděpodobnost nacházení se naměřené hodnoty v daném intervalu, rozšiřuje se kombinovaná standardní nejistota „ u “ o koeficient „ k_u “ na rozšířenou standardní nejistotu U . Tuto rozšířenou standardní nejistotu U vyjadřuje vzorec:

$$U = u \cdot k_u$$

Pravděpodobnost, že se naměřená hodnota skutečné velikosti bude nacházet uvnitř intervalu U , závisí na velikosti koeficientu „ k_u “. V praxi se používá koeficient $k_u = 2$, což odpovídá pravděpodobnosti 95 %.

3. Rozdíly v tolerování pomocí geometrických a rozměrových tolerancí [1], [2], [9]

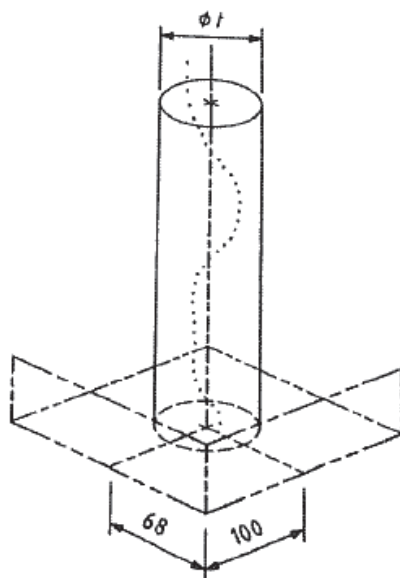
3.1. Tolerance polohy [1], [2], [9]

Tolerance polohy jsou definovány a určeny normou ČSN ISO 1101 a obecně lze říci, že tyto tolerance určují buď polohu bodů, nebo polohu os jednotlivých otvorů, ať už se jedná o klasické otvory kruhového tvaru nebo o otvory čtvercové či obdélníkové.

Tolerance polohy se tedy dělí na:

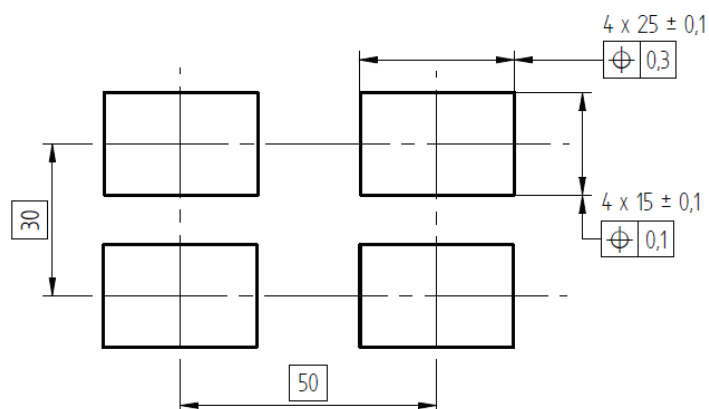
- Tolerance polohy bodu
- Tolerance polohy osy

U tolerance polohy osy musí osa tolerovaného otvoru ležet uvnitř válcového tolerančního pole o průměru rovném toleranci umístění. V případě tolerance polohy osy obdélníkové nebo čtvercového otvoru je toleranční pole limitováno rovnoběžnými rovinami, které jsou symetricky rozloženy vzhledem k ose daného otvoru



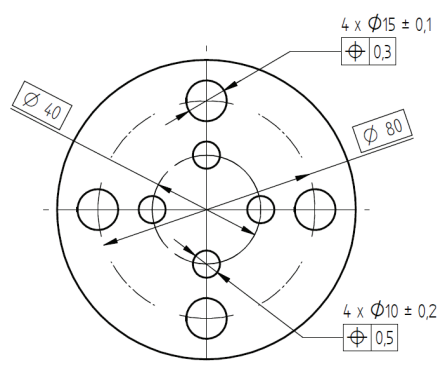
Obrázek 32 – Toleranční pole pro geometrickou toleranci umístění osy [15]

Pro tolerování polohy se nejčastěji využívají teoreticky přesné rozměry s následnou tolerancí polohy, kdy se teoreticky přesnými rozměry zachytí poloha bodu a tolerancí polohy dojde k přesnému určení polohy osy daného otvoru. Tento způsob tolerování polohy se využívá jak pro kruhové otvory, tak pro otvory čtvercového nebo obdélníkové průřezu (příklad pro tolerování polohy otvoru obdélníkového průřezu je uveden na obrázku 33).



Obrázek 33 - Tolerování polohy obdélníkového otvoru pomocí TEDs a tolerance polohy [2]

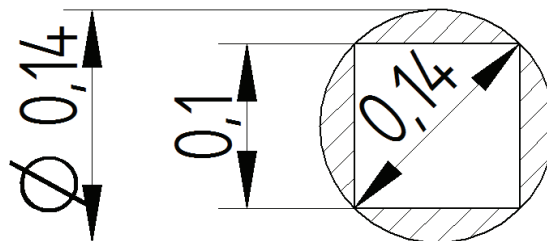
V některých případech není teoreticky přesný rozměr nutný na výkresu udávat, toto se týká především tolerování některých úhlových rozměrů, kterými jsou např. tolerování polohy (úhlů) otvorů, které jsou rovnoměrně rozloženy po obvodu roztečné kružnice za předpokladu, že průměr roztečné kružnice je teoreticky přesný nebo tolerování otvorů orientovaných pod úhlem 90° nebo 180° a ležících v jedné rovině.



Obrázek 34 - Ukázka vynechání TED úhlu při daném TED roztečné kružnice [2]

Geometrické tolerance polohy se v současné době stále více předepisují na výkresovou dokumentaci na úkor tolerancí rozměrových, neboť dochází ke zvýšené přesnosti a kvalitě vyrobených součástí a tím k zvýšení konkurenceschopnosti na trhu výrobků.

Při tolerování polohy otvorů pomocí teoreticky přesných rozměrů a geometrické tolerance polohy osy dochází sice ke zvětšení tolerančního pole, neboli toleranční zóny, ale vede to k následně přesnější výrobě. Podmínkou však je použití souřadnicových NC strojů s CNC řízením, které nám umožní najetí přesné pozice, kterou zadavatel výkresové dokumentace udá. Zvětšení tolerančního pole pomocí tolerování polohy teoreticky přesnými rozměry a tolerance polohy osy je znázorněno na obrázku 35.



Obrázek 35 - Zvětšené toleranční pole při použití geometrických tolerancí a TEDs [2]

Výpočet tolerančního pole pomocí teoreticky přesných rozměrů a geometrické tolerance polohy (toleranční pole osy je v řezu kruh):

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 0,14^2}{4} = 0,0154$$

Výpočet tolerančního pole při použití rozměrových tolerancí (toleranční pole je v řezu čtvercového tvaru)

$$S = a^2 = 0,1^2 = 0,0100$$

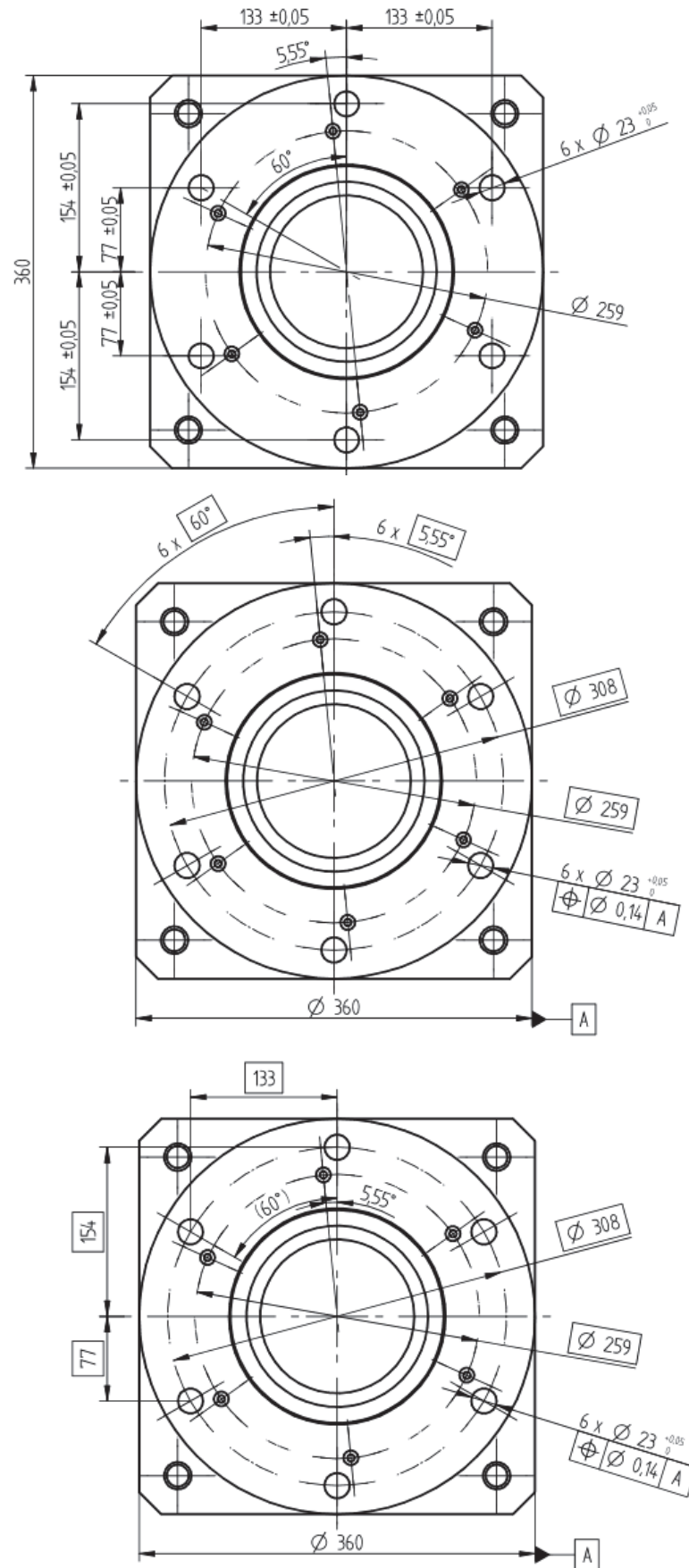
Dále lze z trojčlenky zjistit rozdíl obsahů průřezů tolerančních zón:

$$\frac{0,0100}{0,0154} \cdot 100\% \approx 65\%$$

Toleranční pole při použití geometrické tolerance polohy a teoreticky přesných rozměrů (kruhový průřez) je o 35 % větší než toleranční pole při použití rozměrových tolerancí (čtvercový průřez), což je dokázáno základními matematickými vzorečky pro výpočet obsahů.

Při tolerování polohy otvoru pomocí geometrické tolerance polohy a teoreticky přesných rozměrů nedochází na rozdíl od kótování pomocí rozměrových tolerancí k nepřesnosti výchozího bodu, který následně určuje polohu otvoru, pouze osa otvoru může ležet v určitém tolerančním poli.

Na obrázku 36 je zobrazeno více způsobů pro určení správné polohy otvorů (děr).



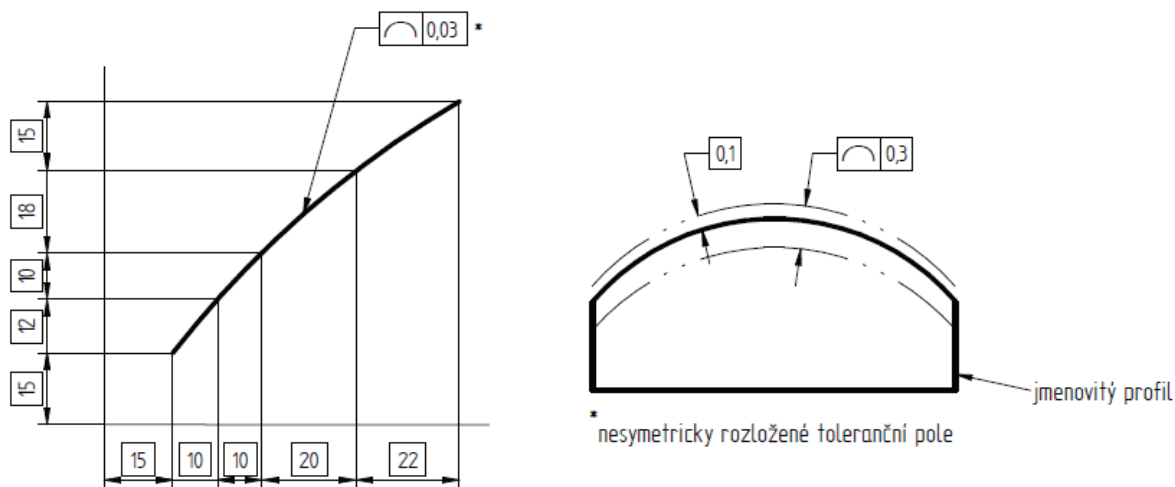
Obrázek 36 - Různé způsoby kótování pro určení polohy otvorů [9]

3.2. Tolerance profilu [1], [2]

Geometrické tolerance jsou definovány a popsány v normě ISO 1101. Při předepisování geometrické tolerance profilu na výkresovou dokumentaci musí konstruktér dbát na rozdíl mezi geometrickou tolerancí čáry a geometrickou tolerancí povrchu, kdy se tolerance týká celého povrchu nikoliv pouze jednoho řezu (tolerance profilu jako čáry).

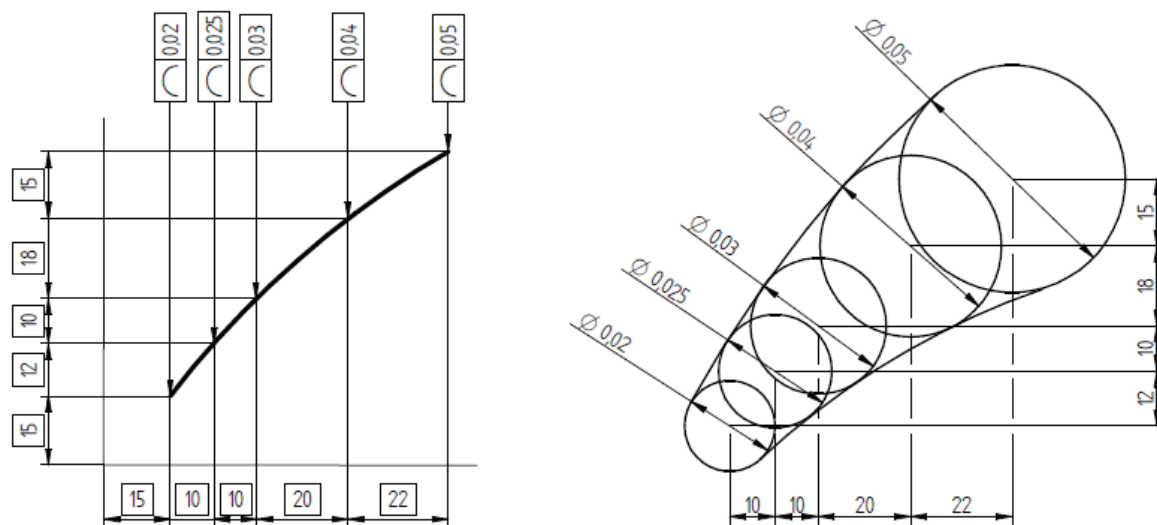
Toleranční pole u geometrické tolerance profilu čáry je definováno dvěma křivkami, které tvoří obalové přímky jednotlivých kružnic, jejichž středy jsou dány (teoreticky přesnými) rozměry, jimiž konstruktér zakóduje jednotlivé body přímky (čáry) profilu. Přičemž každá kružnice má svůj průměr, kterým je charakterizována tvaru křivky. Z toho plyne, že obalové křivky jsou od geometricky ideálního profilu vzdálené o stejnou hodnotu, kterou je poloměr kružnice. Při geometrickém tolerování profilu povrchu (plochy) tvoří toleranční pole zakřivená plocha, která tvoří obálku vepsaných koulí. Jelikož středy koulí musí ležet na teoreticky přesném profilu, toleranční zóna je rovnoměrně rozmístěna na obou stranách jmenovitého profilu povrchu (povrchu).

Pokud chce konstruktér změnit polohu tolerančního pole, musí buď přepočítat teoreticky přesné rozměry, kterými jsou dány středy kružnic nebo koulí (v případě geometrické tolerance plochy), nebo může být nerovnoměrně uspořádáno toleranční pole, což v důsledku znamená, že středy kružnic nebo koulí neleží na jmenovitém profilu čáry nebo plochy (povrchu), z čehož plyne, že toleranční pole neboli toleranční zóna je nesymetricky rozložená vzhledem k jmenovitému profilu nebo ploše.



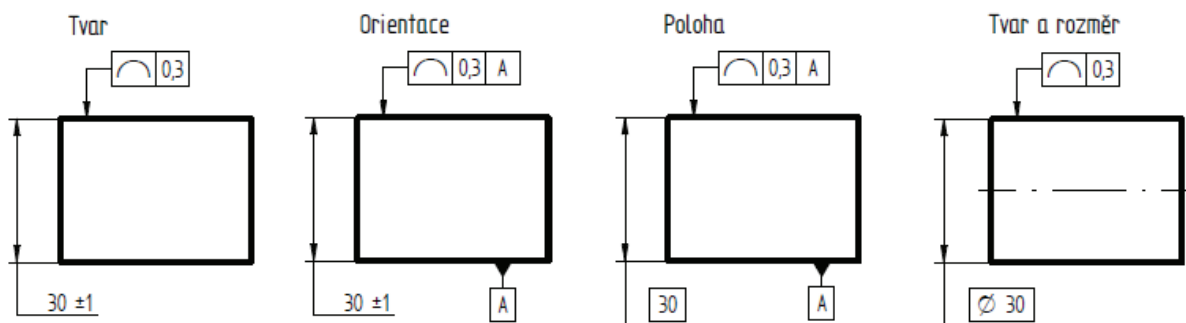
Obrázek 37 - Nesymetrické rozložení tolerančního pole [2]

Může nastat případ, kdy toleranční zóna bude nerovnoměrná, avšak symetricky rozložená vzhledem k jmenovitému profilu. Tento případ je způsoben tím, že toleranční pole je tvořeno kružnicemi o různém průměru, přičemž obalové křivky nestejně velkých kružnic musí tvořit křivku s hladkým průběhem. Tento způsob nerovnoměrného tolerančního pole (zóny) je ukázán na obrázku 38.



Obrázek 38 - Nerovnoměrné toleranční pole [2]

Pomocí geometrického tolerování profilu lze tolerovat jednak tvar, polohu, orientaci, ale také tvar s velikostí prvku, a to vše v závislosti na způsobu kótování pomocí teoreticky přesných rozměrů a předepisování základen, což je ukázáno na obrázku 39.



Obrázek 39 - Možnosti použití tolerance profilu [2]

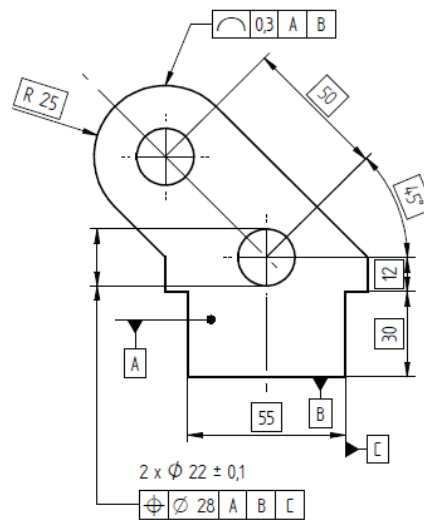
Na obrázku 39 je například ukázáno, jak je možné zakótovat orientaci úsečky pomocí geometrické tolerance. Tento způsob tolerance orientace do určité míry zajistí rovnoběžnost mezi dvěma vodorovnými úsečkami. Také je na tomto obrázku ukázáno, jak je možné zakótovat polohu pomocí geometrické tolerance profilu. Je možné vidět, že pomocí tohoto kótování a tolerování polohy lze zabránit tomu, aby při výrobě došlo k propadu nebo vyboulení úsečky, která je tolerována.

Základní výhodou používání geometrických tolerancí profilu, ať už křivky (čáry) nebo plochy (povrchu) spočívá v jednoduchosti a přesném určení tolerančního pole, neboť při tolerování totožné součásti pomocí rozměrových tolerancí dochází k akumulaci (nahromadění) jednotlivých rozměrových tolerancí a je těžké stanovit, jaké jsou krajní meze obrobku součásti. Také při využívání rozměrových tolerancí (\pm toleranční hodnota) dochází k menším tolerancím než při tolerování pomocí geometrických tolerancí profilu a tudíž i výroba součástí je dražší než při tolerování geometrickými tolerancemi profilu, což se výrazně

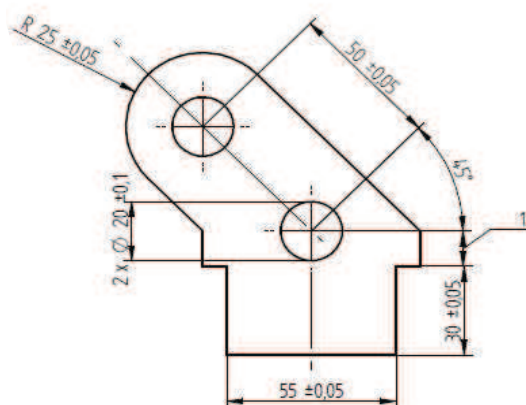
projeví při kusové nebo malosériové výrobě součástí. Proto by se měly veškeré podniky zabývající se touto výrobou přeorientovat na tvorbu výkresové dokumentace pomocí geometrických tolerancí, což povede k zvýšení konkurence v oblasti prodeje na světovém trhu.

Obrázek 40 ukazuje součást tolerovanou pomocí geometrických tolerancí profilu. Díry a rádiusy jsou ve funkčním vztahu k základním povrchům A, B, C. Výkres ukazuje přímo funkční požadavky.

Obrázek 41 ukazuje totožnou součást zakótovanou rozměrovými tolerancemi.



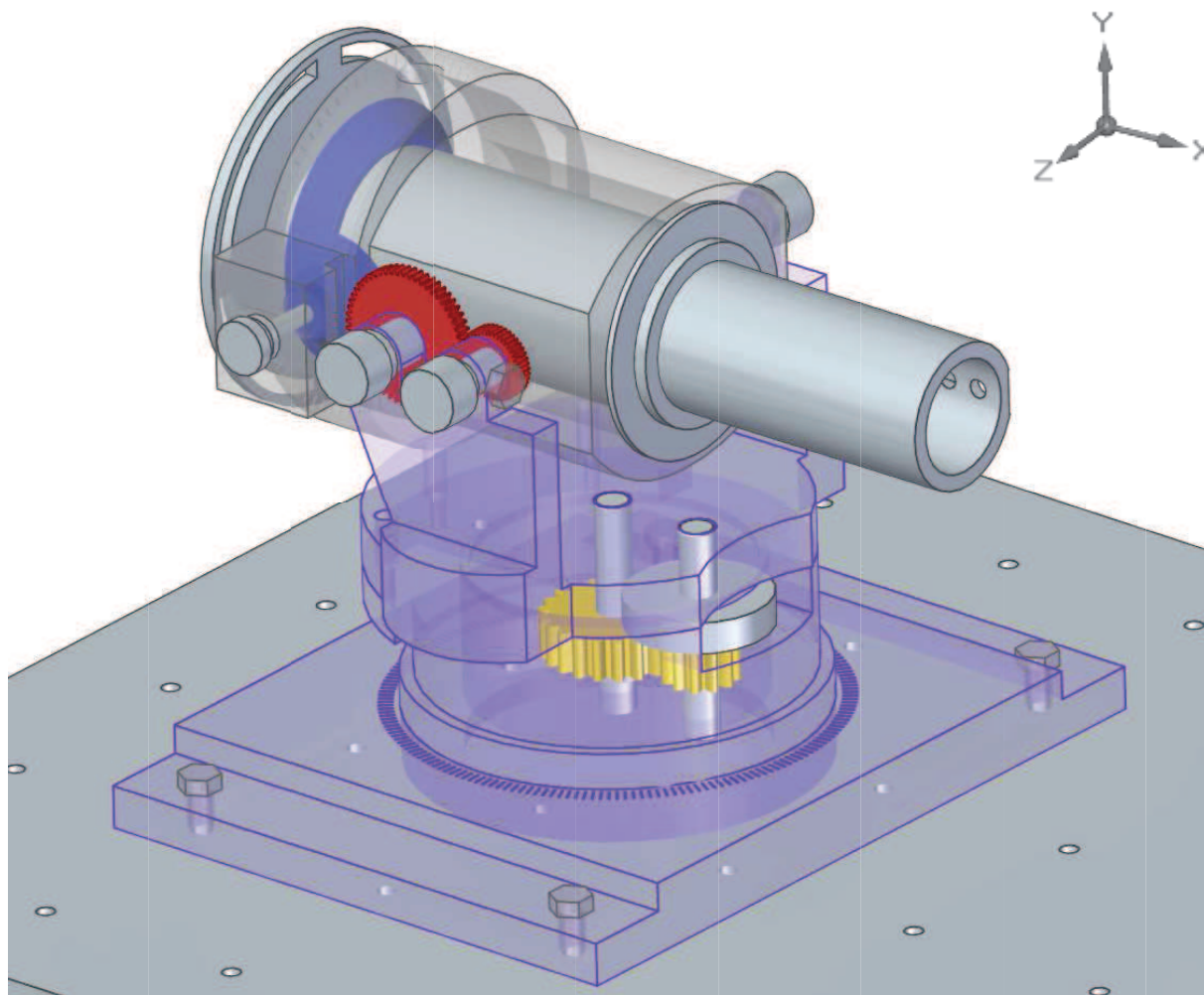
Obrázek 40 - Tolerování pomocí geometrických tolerancí profilu [2]



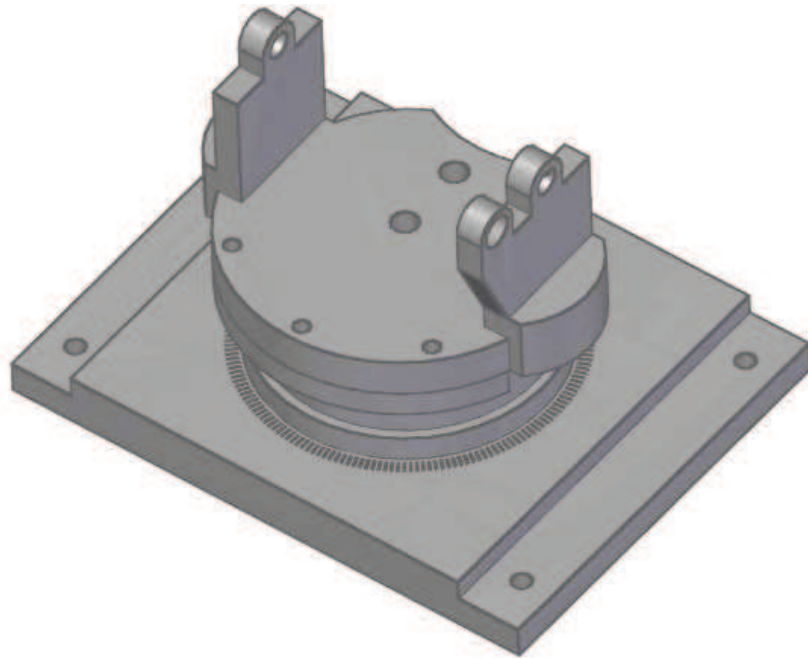
Obrázek 41- Tolerování pomocí rozměrových tolerancí [2]

4. Vlastní řešení [7], [8], [20]

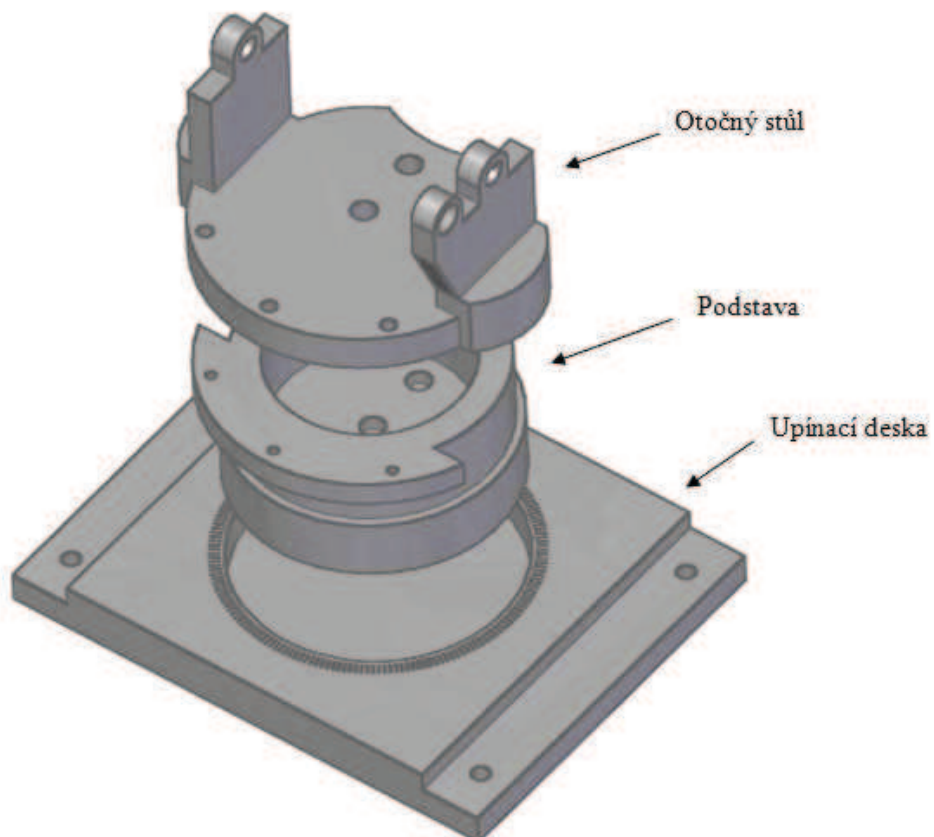
Doposud se tato bakalářská práce zabývala systémem GPS a jeho základními pravidly týkajícími se tolerování a značení na výkresové dokumentaci. Nyní budou tato pravidla ukázána a podrobně rozebrána na konkrétním příkladu přípravku. Přípravek jako celek je ukázán na obrázku 42. Jelikož se přípravek skládá z velkého počtu částí, pro názornou ukázkou (vlastní řešení tolerování) je využita pouze spodní část přípravku, která je na obrázku 42 vyznačena fialovou barvou. Přípravek slouží pro upnutí rotačního nástroje (například vrtáku či frézy a následné měření mikro geometrie a makro geometrie těchto nástrojů) a umožňuje rotační pohyb kolem všech os kartézského souřadnicového systému XYZ. Kolem osy Y je pohyb zajištěn pomocí dvou přímých ozubených kol (žlutá barva), kolem osy Z se přípravek taktéž otáčí pomocí dvou přímých ozubených kol (červená barva), kolem osy X je pohyb zajištěn pomocí kuželového soukolí (kuželové kolo a pastorek modré barvy). Pro následné vlastní řešení se nadále bude tato bakalářská práce zabývat pouze spodní částí přípravku označenou fialovou barvou a zobrazenou na obrázcích níže.



Obrázek 42 - Přípravek pro vlastní řešení

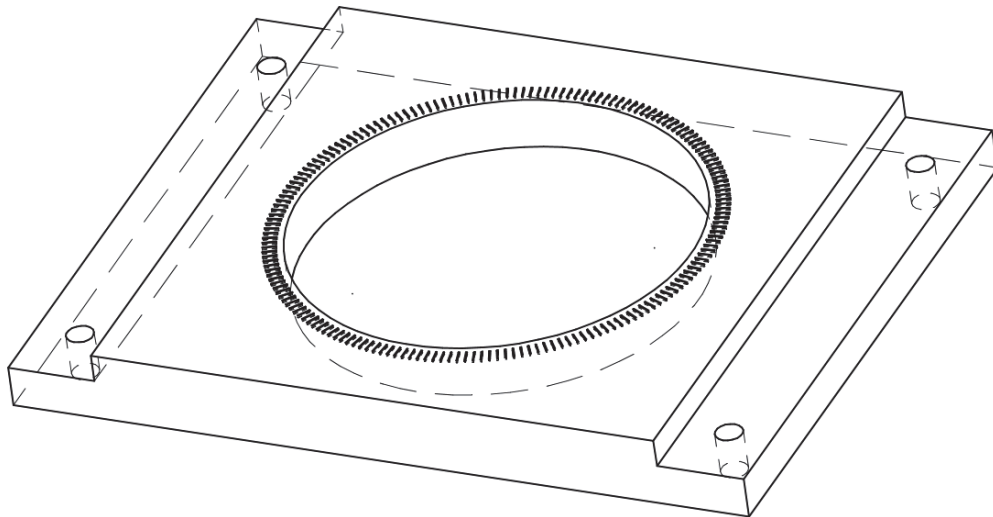


Obrázek 43 - Zkoumaná část přípravku



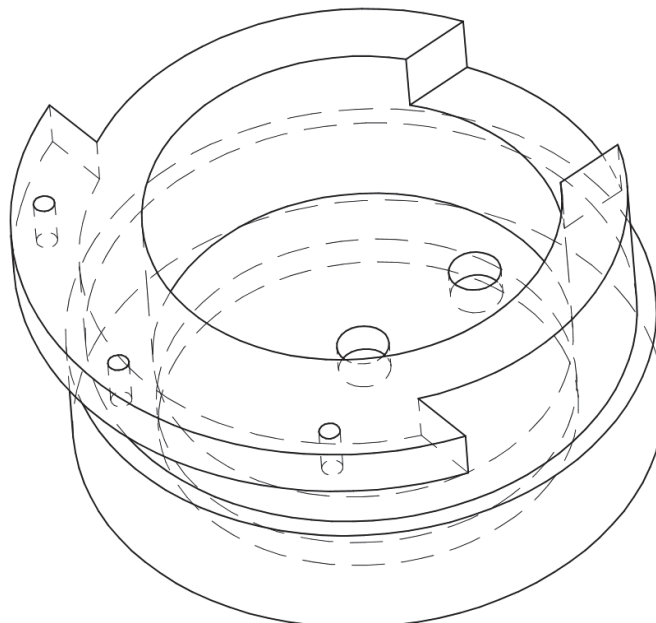
Obrázek 44 - Rozstřel

Součást „upínací deska“ je znázorněna na obrázku 45. Tato deska má 4 díry (otvory), které slouží k přišroubování k základní desce měřicího stroje. Na horní straně upínací desky se nachází válcový otvor, do kterého zapadne součást „podstava“, která se v otvoru otáčí. O kolik se součást „podstava“ pootočí, to znázorňuje stupnice vygravírovaná do horní části „upínací desky“.



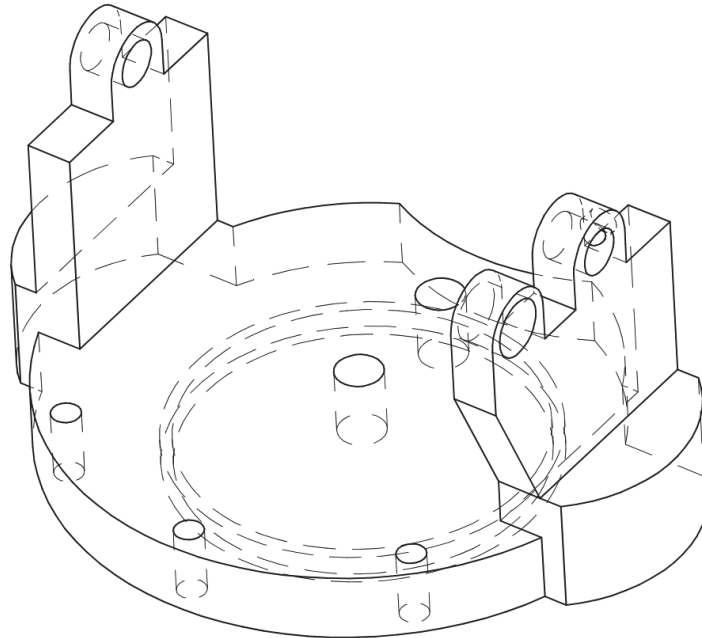
Obrázek 45 - Upínací deska

Obrázek 46 znázorňuje součást „podstava“. Ve spodní části má tato součást válcové vybrání, aby se nemusela předepisovat rovinnost pro celou plochu, nýbrž pouze pro její část, neboť udržet rovinnost na spodní ploše o průměru 90 mm by vyžadovalo náročnější a dražší výrobu. Na horní ploše se nacházejí tři závitové díry, které slouží pro spojení se součástí „otočný stůl“.



Obrázek 46 - Podstava

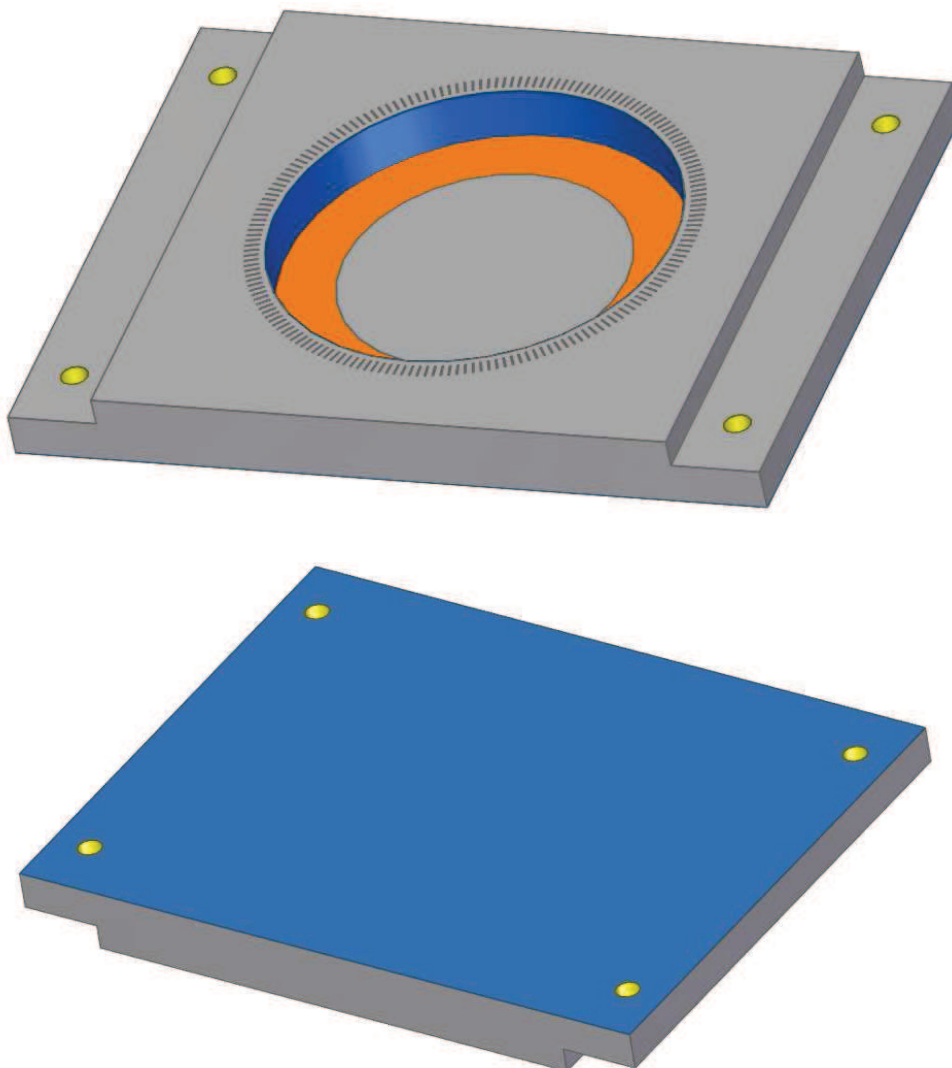
Součást „otočný stůl“ je ukázána na obrázku 47. Tři díry rozložené po obvodu slouží ke spojení se součástí „podstava“. Dva otvory průchozí dnem slouží k průchodu dvou hřídelí, které zajišťují transformaci pohybu z čelního soukolí na otočný stůl a které jsou vloženy do otvorů v součásti „podstava“.



Obrázek 47 - Otočný stůl

Při tolerování součásti nebo sestavy součástí musí být provedena analýza funkce jednotlivých komponent (součástí), jinými slovy se musí určit, jak daná komponenta funkčně funguje společně s dalšími komponenty sestavy (v tomto případě přípravku). Společné funkční plochy jsou na následujících obrázcích označeny stejnou barvou.

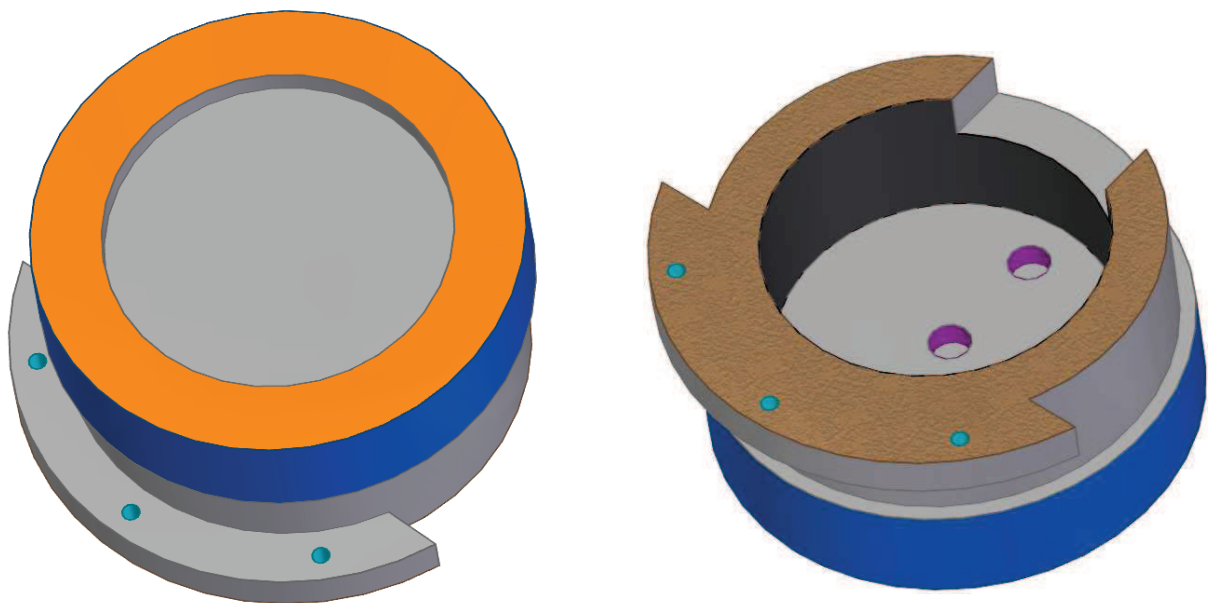
Upínací deska musí mít rovnou dosedací plochu k základní desce, tato plocha je vyznačená světle modrou barvou na obrázku 48. Žlutě vyznačené díry (otvory) musí zajišťovat správnou polohu, tím je umožněno správné připevnění k základní desce stroje. Oranžově vyznačen část dna musí také splňovat rovinnost kvůli správné funkci součásti „podstava“. Tmavě modrá válcová plocha klade důraz na dodržení přesnosti, aby při uložení a otáčení součásti „podstava“ docházelo k plynulé rotaci.



Obrázek 48 - Funkční plochy součásti "upínací deska"

Stejně tak jako upínací deska musí splňovat požadavek přesnosti, musí být tento požadavek splněn i u součásti, která do upínací desky zapadá, v tomto případě tedy u součásti „podstava“. Tmavě modrá válcová plocha tedy znázorňuje požadavek přesnosti, oranžová plocha značí požadavek rovinnosti dosedací plochy.

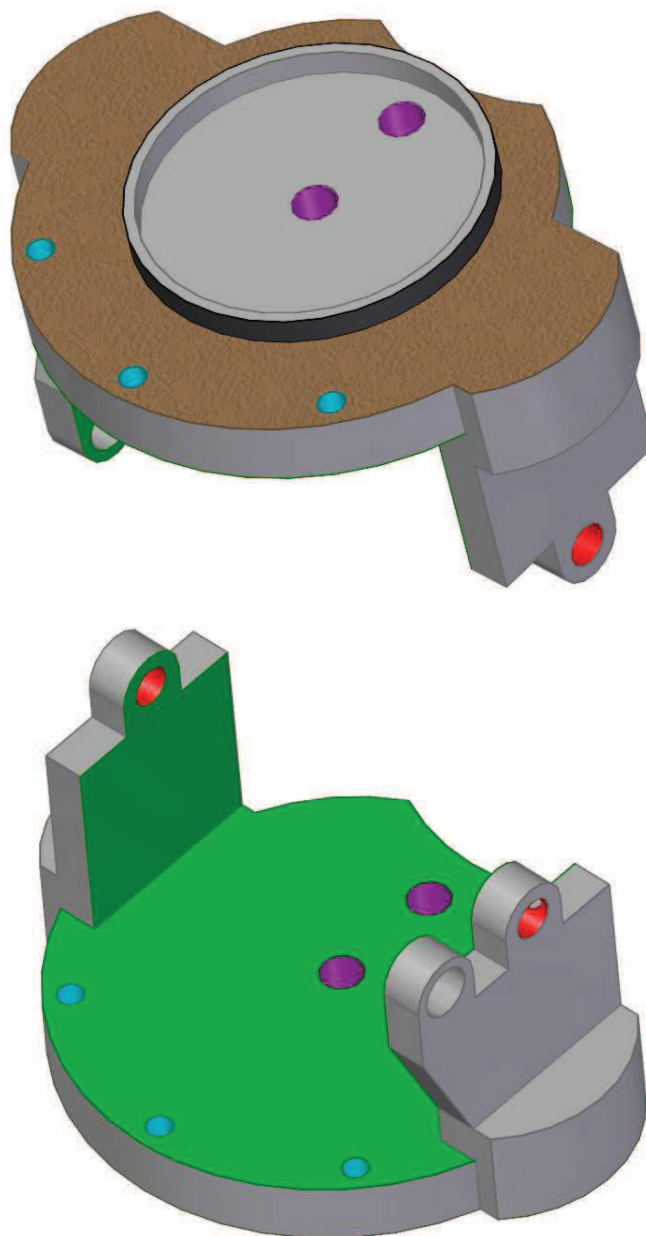
Na druhém pohledu podstavy jsou otvory obarvené tyrkysovou barvou. Tato barva značí požadavek na správné umístění závitových otvorů, které je nutné pro správné připevnění součásti „otočný stůl“. Hnědá barva značí požadavek rovné plochy pro správné dosednutí otočného stolu. Fialové díry musí splňovat správnou polohu, aby se hřídele, které se později do přípravku budou vkládat, nepříčily a aby byla zajištěna správná poloha ozubeného kola a pastorku pro rotaci okolo osy Y. Černá barva značí požadavek přesnosti pro správné vystředění součásti „otočný stůl“. Všechny tyto požadavky jsou znázorněny na obrázku 49.



Obrázek 49 - Funkční plochy součásti "podstava"

Na otočný stůl jsou kladeny stejné požadavky, jako na součást „podstava“. Tyto požadavky jsou znázorněny stejnými barvami, jako u podstavy. Je to správné umístění tyrkysových a fialových otvorů, hnědě vyznačená rovinná dosedací plocha a přesně vyrobený černý prsteneček pro správně vystředění a uložení v součásti „podstava“.

Dále je pro správnou funkci přípravku požadována kolmost bočních stěn, na obrázku 50 vyznačeno zelenou barvou. Na protilehlých otvorech na bočních stěnách musí být pro přesnost přípravku jako celku splněn požadavek sousostí, tyto funkční plochy jsou označeny červeně.



Obrázek 50 - Funkční plochy součásti "otočný stůl"

Během tolerování sestavy se v tomto případě bude postupovat pomocí postupu „IfGPS 8-point tolerancing procedure“, což popisuje 8bodový toleranční postup IfGPS. Tento postup systematicky vyvinuli společně Per Bennich a Henrik Nielsen.

8bodový toleranční postup IfGPS obsahuje následující body:

1. Stanovení vztažných systémů
2. Rozměrové tolerance
3. Umístění prvků s pevnými tolerancemi
4. Mobilní tolerance
5. Nezávislé tolerance
6. Kombinace tolerancí
7. Tolerance textury povrchu
8. Tolerance hran

Je třeba zdůraznit, že se jedná o velice jednoduchou konstrukci (sestavu) a že v tomto případě je funkční analýza velmi jednoduchá. Pro konstrukce (sestavu), kde je funkce složitější, je nutné se ujistit, že konstruktér pochopil správně funkci dané sestavy. Kdyby tomu tak nebylo, odrazí se to ve špatném tolerování daných prvků, a tím nebude zajištěna správná funkce výrobku.

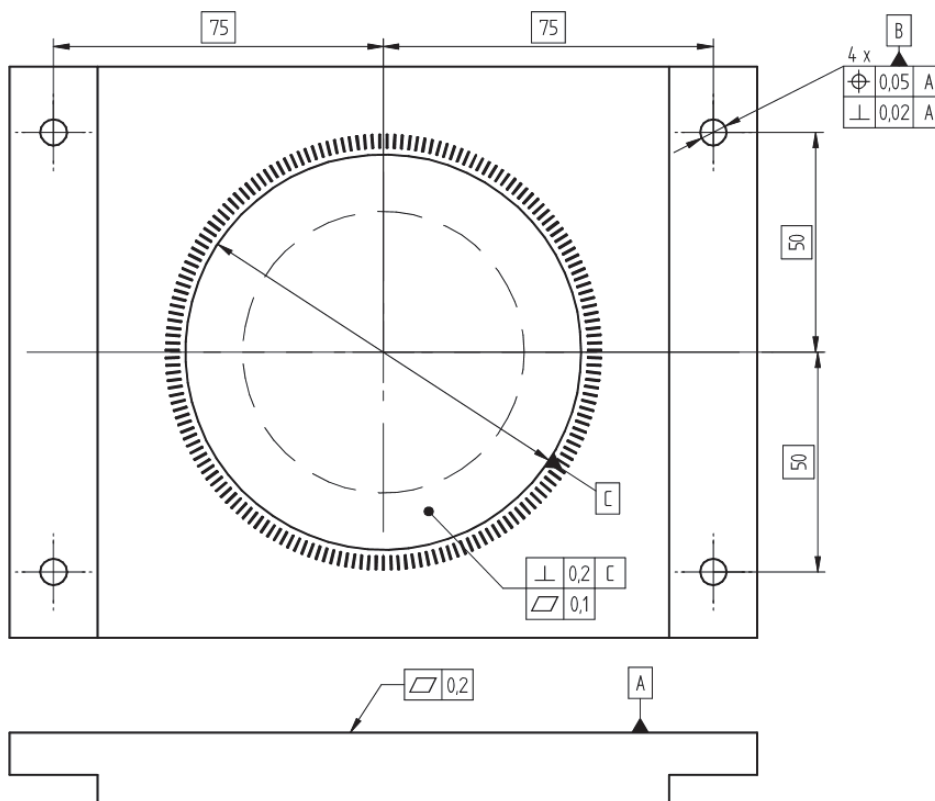
Dále je nutno říci, že hodnoty velikostí tolerančních polí jsou na následujících stránkách předepisovány pouze odhadem, neboť jde o ukázkou správného tolerování pomocí IfGPS a ne o konkrétní výkresovou dokumentaci určenou pro výrobu daných součástí.

4.1. Stanovení vztažných systémů [8]

Prvním krokem v postupu IfGPS je stanovení vztažných systémů. Tento krok lze rozdělit do tří částí, a to na stanovení globálních vztažných systémů, stanovení lokálních vztažných systémů a předepsání TEDs. Pomocí předepsání globálního systému jsou odebrány potřebné stupně volnosti, základny předepsané lokálním systémem už neodebírají stupně volnosti, ale slouží jako základny pro další tolerování, které je nutné pro správnou funkci součástí.

4.1.1. Vztažný systém pro upínací desku

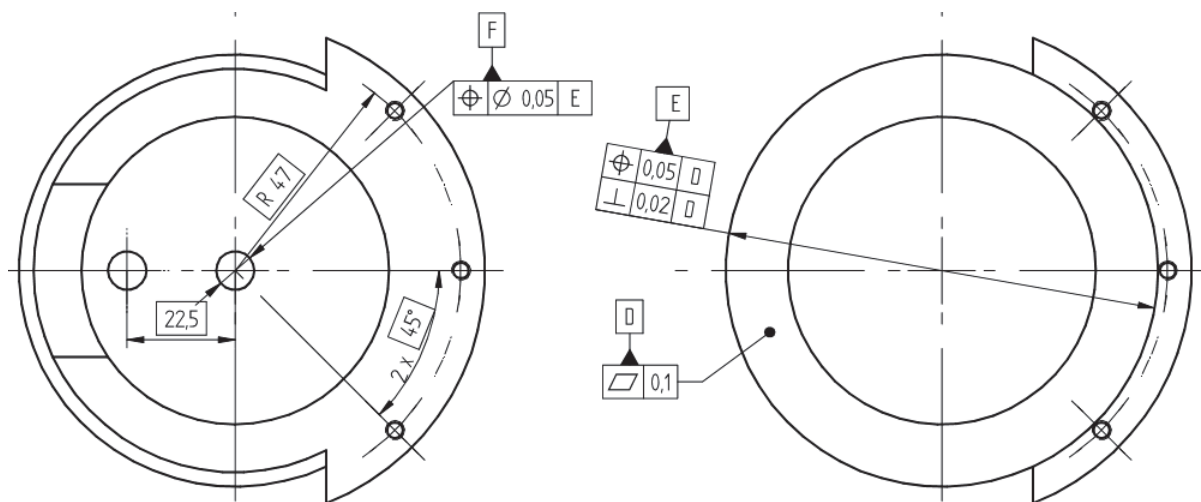
Jako první byla předepsána základna A na dolní plochu součásti „upínací deska“, která součásti odebere tři stupně volnosti (součást dále umožňuje pouze posuv v ose X a Z a rotaci kolem osy Y). Na dolní plochu součásti je předepsána rovinnost. Dále byla předepsána základna B (odebere zbylé stupně volnosti), jimiž jsou osy děr sloužících pro připevnění upínací desky k podkladu stroje. Tím byly odebrány všechny stupně volnosti. Pro lokální vztažný systém byla předepsána základna C (osa středícího otvoru), pro dno otvoru předepsána rovinnost a kolmost vůči základně C. Polohy otvorů pro připevnění k podkladu stroje jsou dále určeny pomocí TEDs.



Obrázek 51 - Vztažný systém pro součást „upínací deska“

4.1.2. Vztažný systém pro podstavu

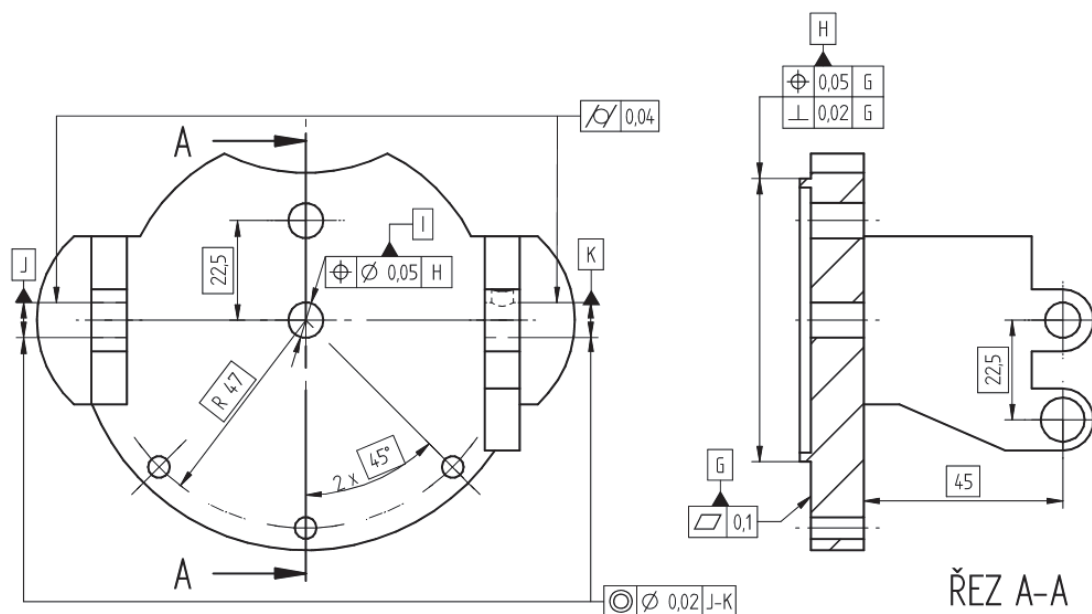
V první řadě musí být opět zajištěno odebrání potřebných stupňů volnosti. Posuv do osy Y a rotace kolem os X a Z je uzamčen pomocí předepsání základny D na dolní plochy součásti. Na tuto plochu je následně předepsaná rovinnost. Přidáním základny a tolerancí k průměru dna je již povolena pouze rotace kolem osy Y, což je správně pro funkci přípravku. Dále je předepsána základna F a poloha díry náležející této základně. Pro úplnost jsou doplněny také teoreticky přesné rozměry.



Obrázek 52 - Vztažný systém pro součást „podstava“

4.1.3. Vztažný systém pro otočný stůl

V první řadě opět předepíšeme základy pro odebrání potřebných stupňů volnosti. Těmito základnami jsou spodní plocha součásti – základna G a osa prstence pro vystředění součásti – základna H. Pro dolní plochu součásti byla předepsána tolerance rovinnosti a pro osu prstence byly předepsány tolerance polohy a kolmosti. Základny J a K jsou osy postranních otvorů a tyto otvory jsou tolerovány souosostí a válcovitostí. Další lokální základnou je základna I (osa prostřední díry). Na obrázku jsou také přidány potřebné TEDs.



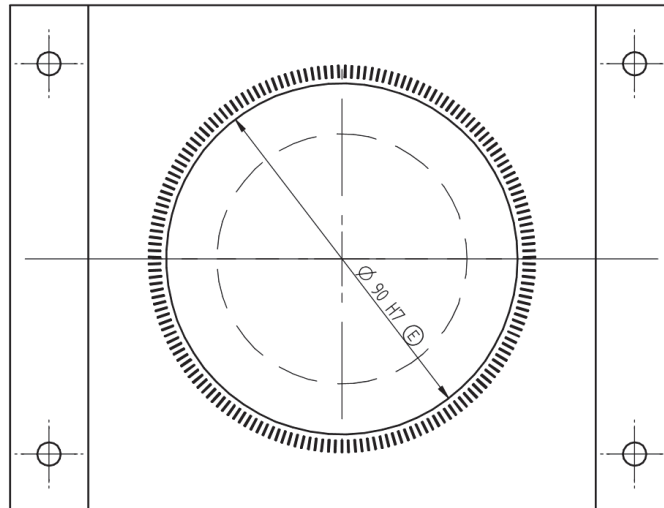
Obrázek 53 - Vztažný systém pro součást „otočný stůl“

4.2. Rozměrové tolerance [8]

Dalším bodem v postupu IfGPS je tolerovat ty rozměry prvků, které tvoří uložení. Obecně má smysl používat princip obalové plochy, protože dané prvky jsou součástí tvořící uložení.

4.2.1. Rozměrové tolerance pro upínací desku

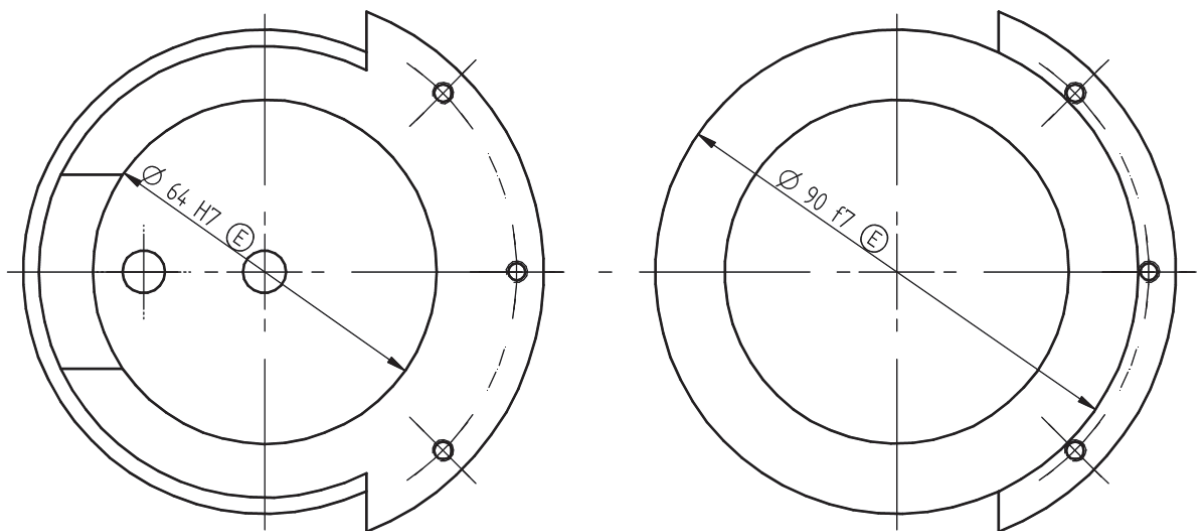
Na upínací desce je pouze jeden prvek, který se účastní uložení, a tím je středící válec pro uložení podstavy. Jelikož se ve středícím válci bude podstava otáčet, bylo zvoleno uložení H7.



Obrázek 54 - Rozměrové tolerance pro součást "upínací deska"

4.2.2. Rozměrové tolerance pro podstavu

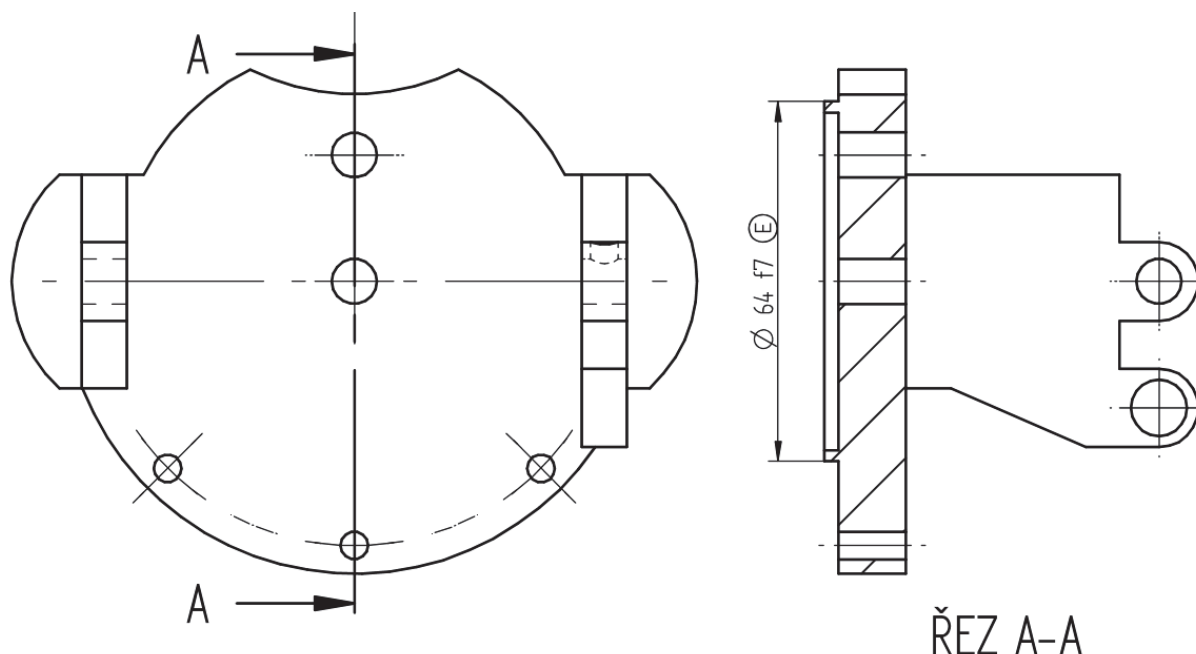
Podstava má dva prvky, které tvoří uložení. Jedním z nich je středící válec zapadající do podstavy, na nějž bylo zvoleno a předepsáno uložení f7. Druhým prvkem je válcová díra, do níž zapadne středící prstenec na otočném stole. Pro díru bylo zvoleno uložení H7.



Obrázek 55 - Rozměrové tolerance pro součást "podstava" (pohled shora a zdola)

4.2.3. Rozměrové tolerance pro otočný stůl

Otočný stůl se účastní uložení pouze středícím prstencem. Hodnota tohoto uložení byla zvolena f7.



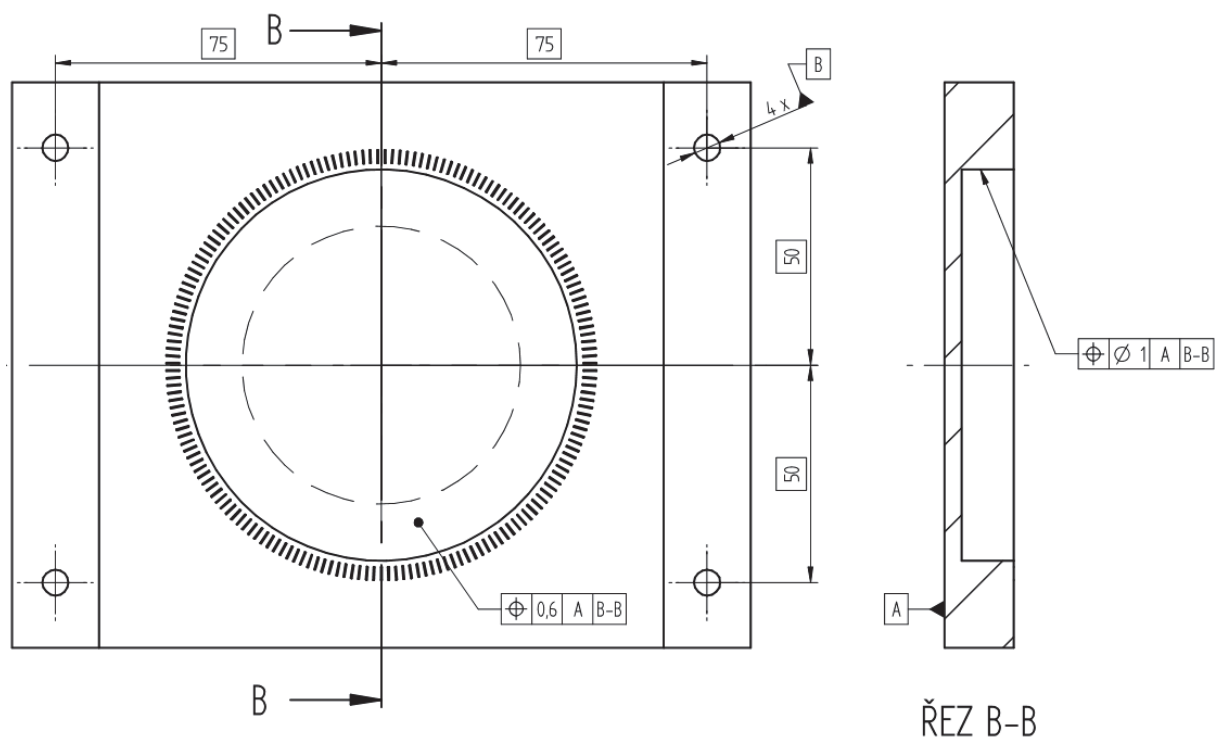
Obrázek 56 - Rozměrové tolerance pro součást "otočný stůl"

4.3. Umístění prvků s pevnými tolerancemi [8]

Pod pojmem pevné neboli fixní tolerance rozumíme všechny tolerance, které ovlivňují plochy odebírající součásti nepřesně stanovené stupně volnosti pomocí předepsaných základů. Obecně lze tedy říci, že pevné (fixní) tolerance předepíšeme tam, kde je nutné, aby plochy, jichž se tolerance týkají, byly v požadované poloze z důvodu správného uložení (sestavení) do montážního celku.

4.3.1. Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro upínací desku

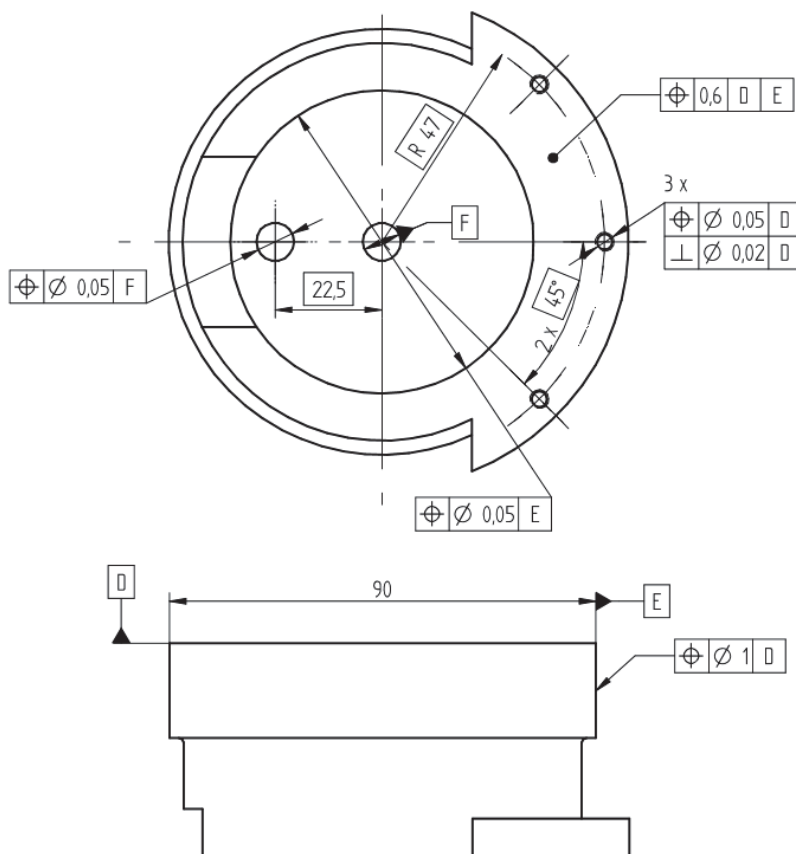
Na obrázku 57 je možné vidět, jak byly pevné tolerance předepsány pro upínací desku. Jelikož pro tuto součást je důležitá poloha vnitřního otvoru, byla pevná tolerance předepsaná pouze na dno a vřadovou plochu tohoto kruhového otvoru a to pomocí tolerance polohy.



Obrázek 57 - Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro součást "upínací deska"

4.3.2. Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro podstavu

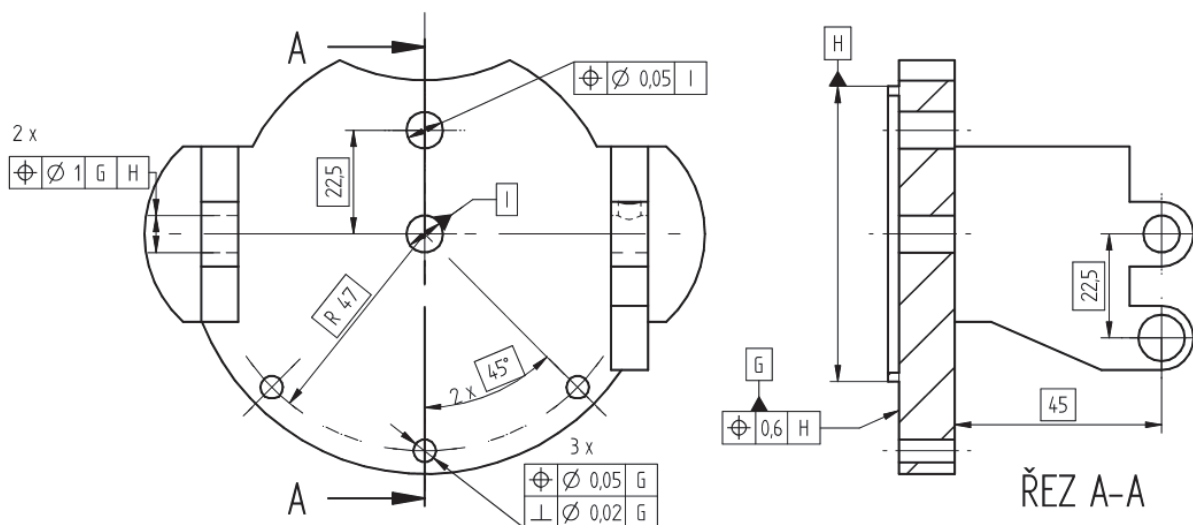
Na obrázku 58 je ukázáno předepsání fixních (pevných) tolerancí pro podstavu. Pro tuto součást je důležitá poloha válcové části, aby lehce zapadlo do vybrání v upínací desce a dále poloha díry pro hřídel, aby byl umožněn plynulý záběr ozubených kol pro rotaci okolo osy Y. V neposlední řadě je důležitá poloha děr pro sešroubování se součástí „otočný stůl“ a středící díra pro vystředění součásti „otočný stůl“. Taktéž horní dosedací plocha pro otočný stůl je důležitá a předepsána tolerancí polohy.



Obrázek 58 - Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro součást „podstava“

4.3.3. Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro otočný stůl

Obrázek 59 znázorňuje předepsání fixních (pevných) tolerancí pro otočný stůl. Související plochy s podstavou jsou tolerovány stejně, navíc je předepsána poloha protilehlých děr na bočních stěnách.



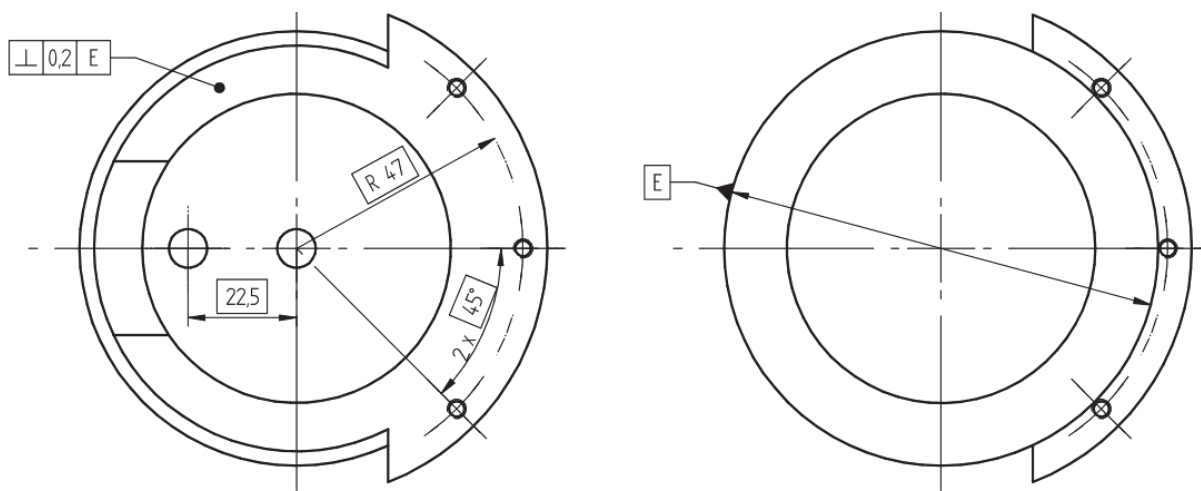
Obrázek 59 - Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro součást "otočný stůl"

4.4. Mobilní tolerance [8]

Mobilní tolerance jsou tolerance, kde některé, ale ne všechny nepřebytečné stupně volnosti lze zajistit odkazy na základny.

4.4.1. Mobilní tolerance pro podstavu

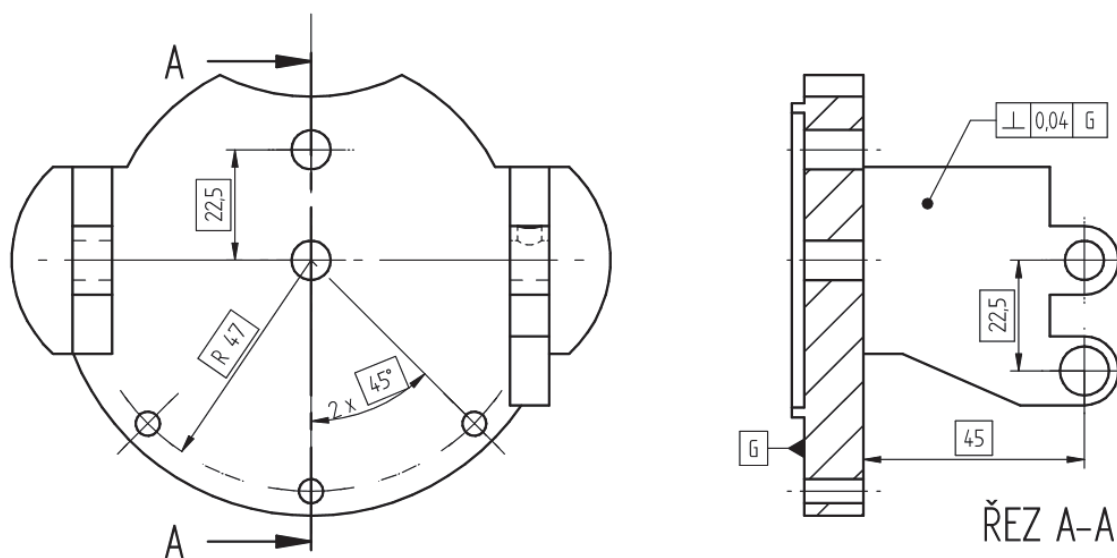
Na obrázku 60 jsou předepsány mobilní tolerance pro podstavu. Jedná se pouze o kolmost dosedací plochy pro otočný stůl, která je předepsána vzhledem k základně E, kterou je osa vnějšího válcového tvaru.



Obrázek 60 - Mobilní tolerance pro součást "podstava" (pohled shora a zdola)

4.4.2. Mobilní tolerance pro otočný stůl

Jedinou potřebnou mobilní tolerancí pro otočný stůl je kolmost bočních stěn, která je znázorněna na obrázku 61.



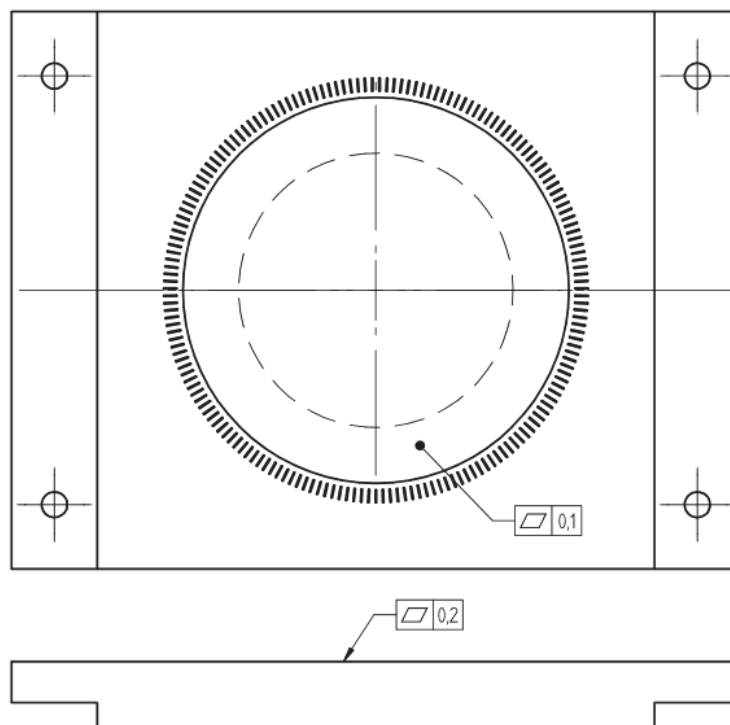
Obrázek 61 - Mobilní tolerance pro součást "otočný stůl"

4.5. Nesouvisející tolerance [8]

Nesouvisející tolerance jsou tolerance, které se nevztahují k předepsaným základnám (např. tolerance rovinnosti nebo válcovitosti).

4.5.1. Nesouvisející tolerance pro upínací desku

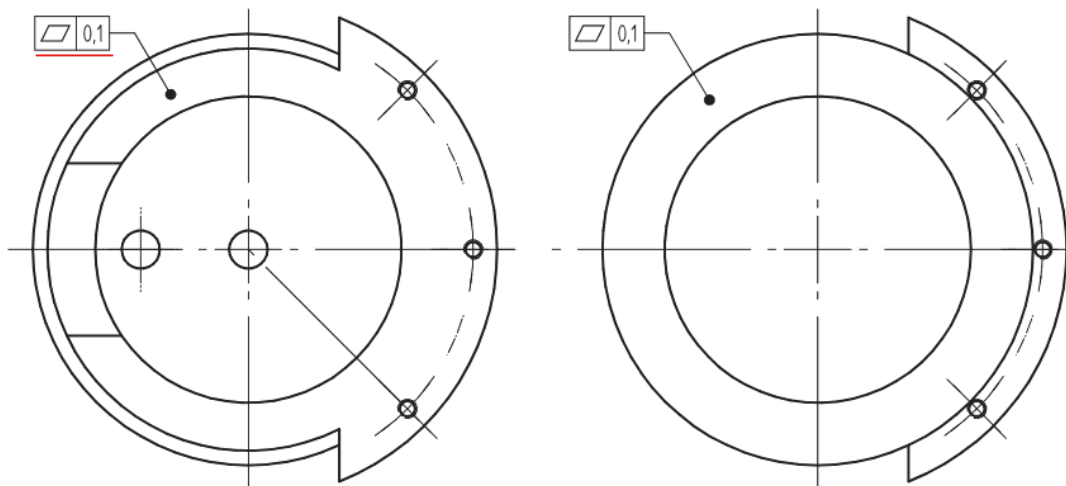
Na obrázku 62 jsou zobrazeny všechny nesouvisející tolerance tvaru pro upínací desku. Tyto tolerance byly předepsány již v prvním bodě.



Obrázek 62 - Nesouvisející tolerance pro součást "upínací deska"

4.5.2. Nesouvisející tolerance pro podstavu

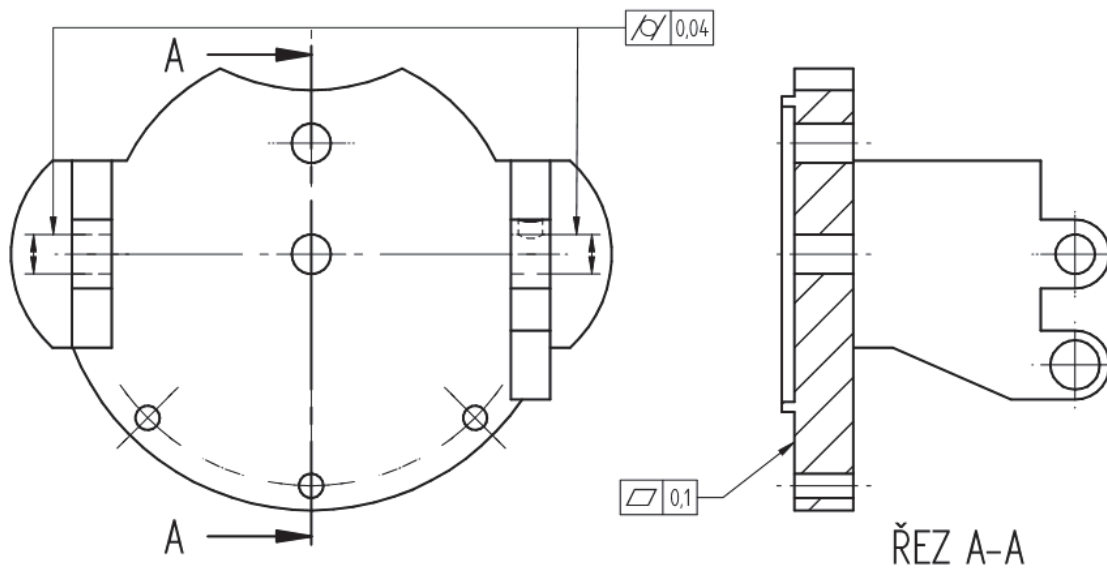
Na obrázku 63 jsou zobrazeny všechny nezávislé tolerance tvaru pro podstavu. Tolerance rovinnosti spodní části válce byla předepsána již v bodě 1, v tomto bodě byla přidána pouze tolerance rovinnosti horní plochy podstavu, která je pro jasnost podtržena červeně.



Obrázek 63 - Nesouvisející tolerance pro součást "podstava" (pohled shora a zdola)

4.5.3. Nesouvisející tolerance pro otočný stůl

Na obrázku 64 jsou ukázány všechny nesouvisející tolerance tvaru pro otočný stůl. Tyto tolerance byly předepsány již v prvním bodě. Jedná se o toleranci válcovitosti otvorů na bočních stěnách a toleranci rovinnosti spodní plochy pro dosednutí na součást „podstava“



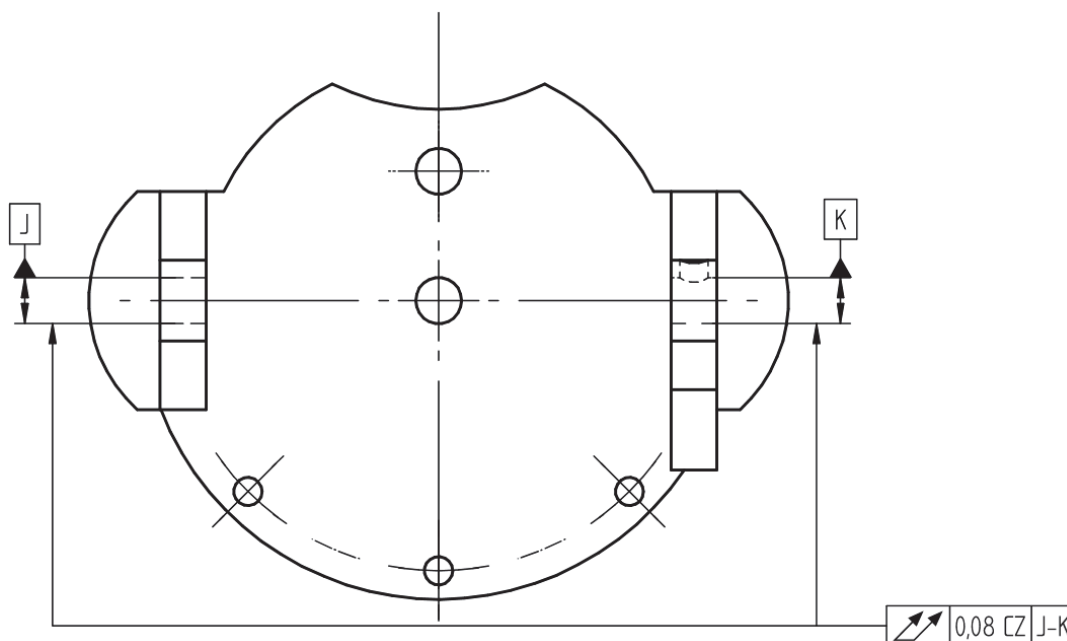
Obrázek 64 - Nesouvisející tolerance pro součást "otočný stůl"

4.6. Kombinace tolerancí [8]

Účelem tohoto bodu v tolerančním postupu IfGPS je zvýšení flexibility tak, aby byla možná jednodušší a méně nákladná výroba. Existují dvě hlavní skupiny geometrických tolerancí, které jsou vhodné na kombinování. Jednou z nich je kombinace tolerancí souososti a válcovitosti do tolerance celkového házení, druhou skupinou je kombinace soustřednosti a kruhovitosti do kruhového házení. Jako další způsob kombinování tolerancí se nabízí kombinace rozměrových tolerancí a tolerancí závislých (obvykle pomocí podmínky maxima materiálu nebo podmínky reciprocity).

Kombinace geometrických tolerancí jsou vhodné obvykle pro rotující součásti nebo pro součásti, do kterých rotující součásti patří (dosedací plochy). V tomto konkrétním případě je to otočný stůl, kde je nutné, aby protilehlé díry na stěnách byly válcovité a souosé zároveň.

Protože tato tolerance kombinuje souosost a válcovitost, hodnoty daných tolerancí se sčítají. Nicméně kvůli tomu, že tolerance válcovitosti a celkového házení jsou obě radiální hodnoty pro povrch a tolerance souososti je hodnota průměru válce, ve kterém musí ležet osa, tolerance souososti umožňuje dvě radiální variace. Proto se před sečtením tolerancí hodnota souososti násobí dvěma.



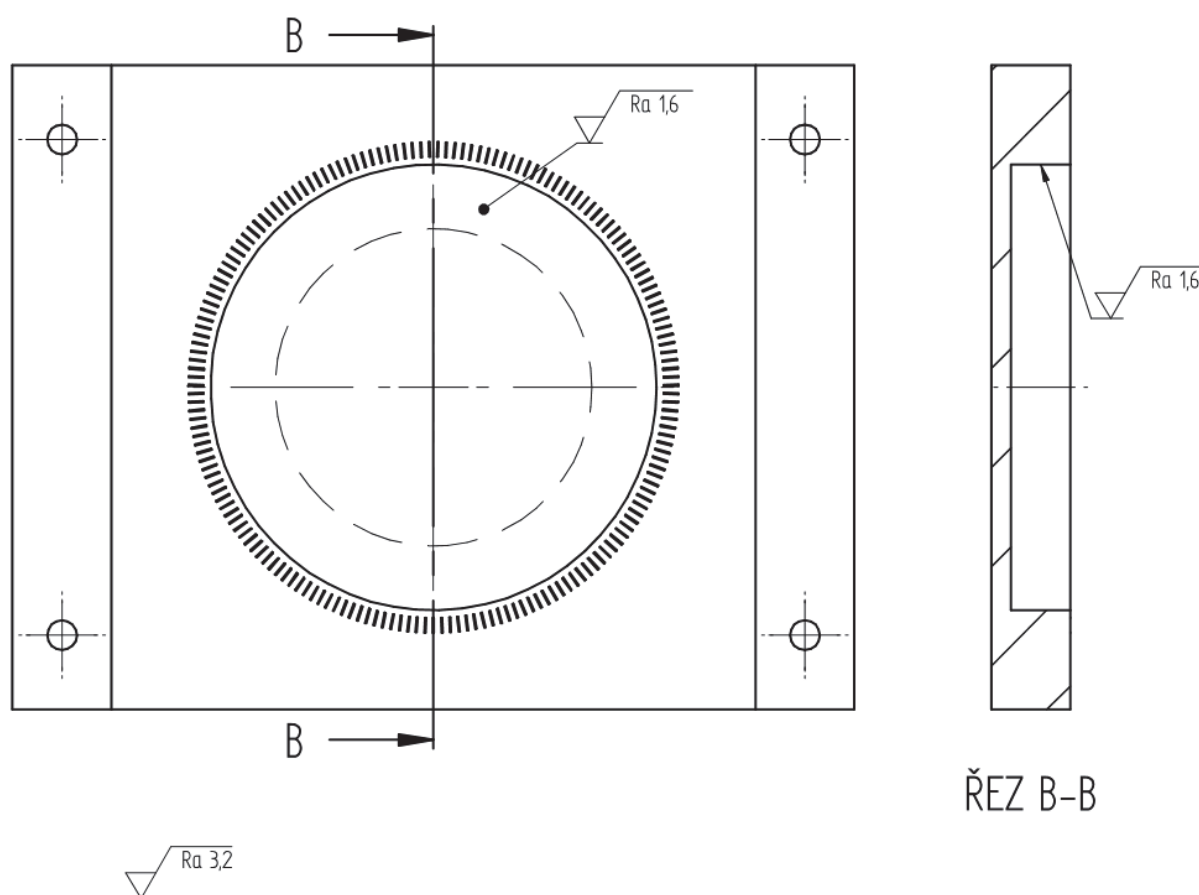
Obrázek 65 - Kombinace tolerancí pro součást "otočný stůl"

4.7. Tolerance textury povrchu [8]

Pokud se jedná o tolerance textury povrchu, hlavní požadavky jsou pro povrchy, které se po sobě pohybují, neboť tyto povrchy (plochy) jsou důležité z hlediska funkčnosti sestavy.

4.7.1. Tolerance textury pro upínací desku [7]

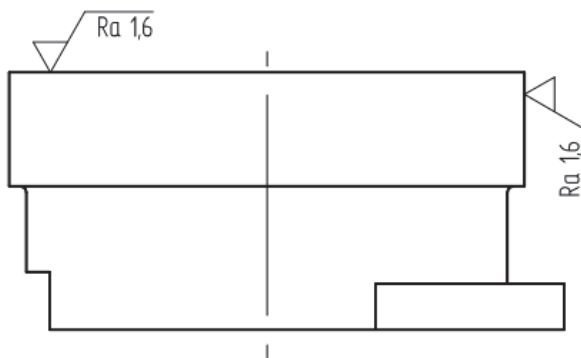
Na upínací desce jsou dvě místa (plochy), které se vzájemně dotýkají s protikusem (součást „podstava“) při pohybu okolo osy Y, těmito plochami jsou stěna válcového otvoru, v němž se otáčí součást „podstava“ a dále část jeho dna, na které součást „podstava“ dosedá. Předpis tolerancí povrchu je znázorněn na obrázku 66. Vzhledem k daným uložením (kapitola 4.2.) je vhodná drsnost $R_a 1,6$. Pro netolerované plochy byla předepsána obecná tolerance $R_a 3,2$.



Obrázek 66 - Tolerance textury pro součást "upínací deska"

4.7.2. Tolerance textury pro podstavu [7]

Na součásti „podstava“ jsou také dvě plochy, které se pohybují proti protikusu (upínací deska) při pohybu okolo osy Y. Těmito plochami jsou stěna středícího válce, který se otáčí v upínací desce a dále část dna podstavy, na které součást dosedá. Předpis tolerancí povrchu je znázorněn na obrázku 67 a jejich hodnoty jsou stejné jako u předchozího případu.



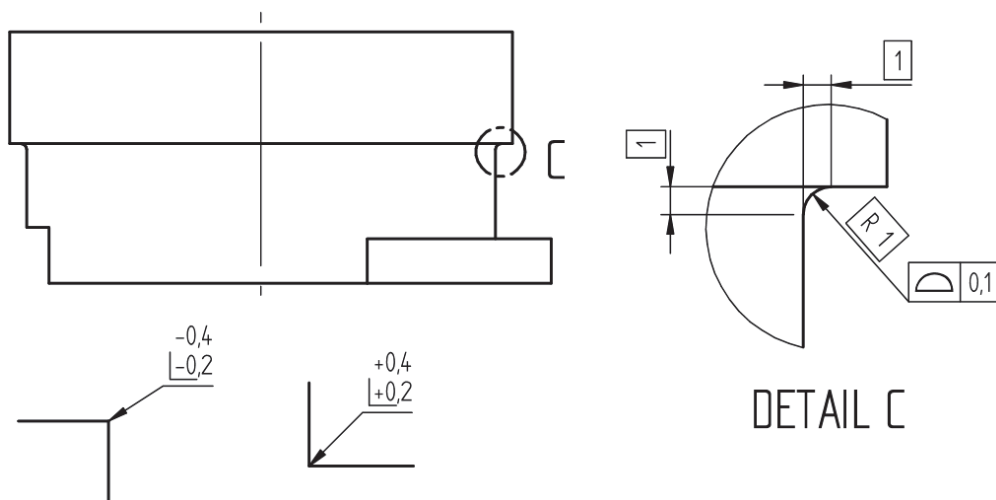
Obrázek 67 - Tolerance textury povrchu pro součást "podstava"

4.8. Tolerance hran [8]

Posledním bodem v tolerančním postupu IfGPS tolerování je tolerování hran. V tomto konkrétním případě (tolerování spodní části přípravku) není nutné hrany tolerovat, neboť hrany vyžadující tolerování jsou většinou hrany, kde dochází k přechodům (např. osazení na hřídelích) z důvodu možných únavových lomů. Následující tolerování součásti „podstava“ je pouze ilustrační.

4.8.1. Tolerance hran pro podstavu

Pro přechod mezi průměry podstavy je předepsán rádius pomocí tolerance profilu povrchu. Tento způsob kontroly geometrie přechodu je úplný. Pro hrany bez udané konkrétní tolerance byla předepsána obecná tolerance, která požaduje ubrání materiálu na vnějších hranách a přidání materiálu na hranách vnitřních (viz. obrázek 68 níže).

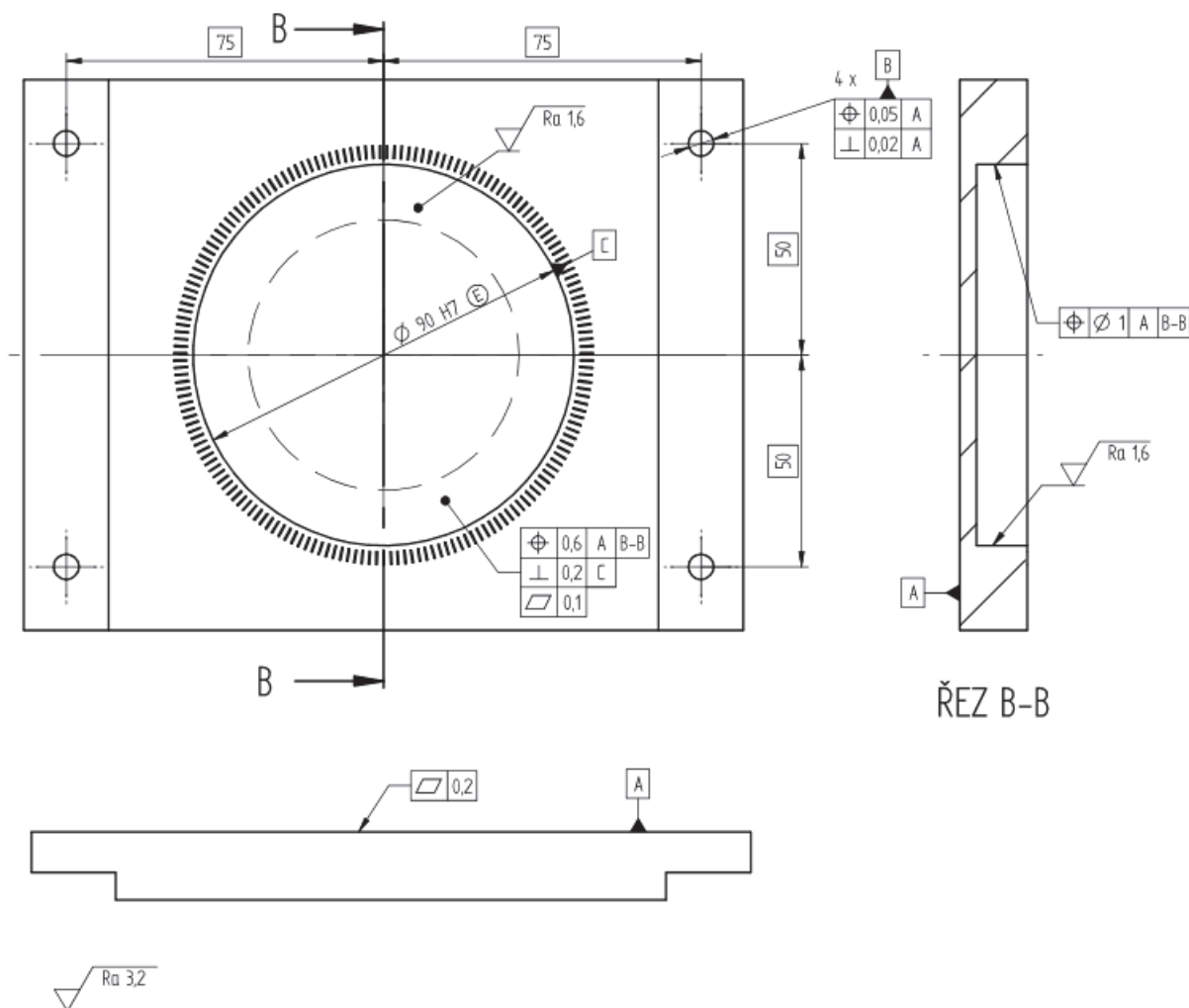


Obrázek 68 - Tolerance hran pro součást "podstava"

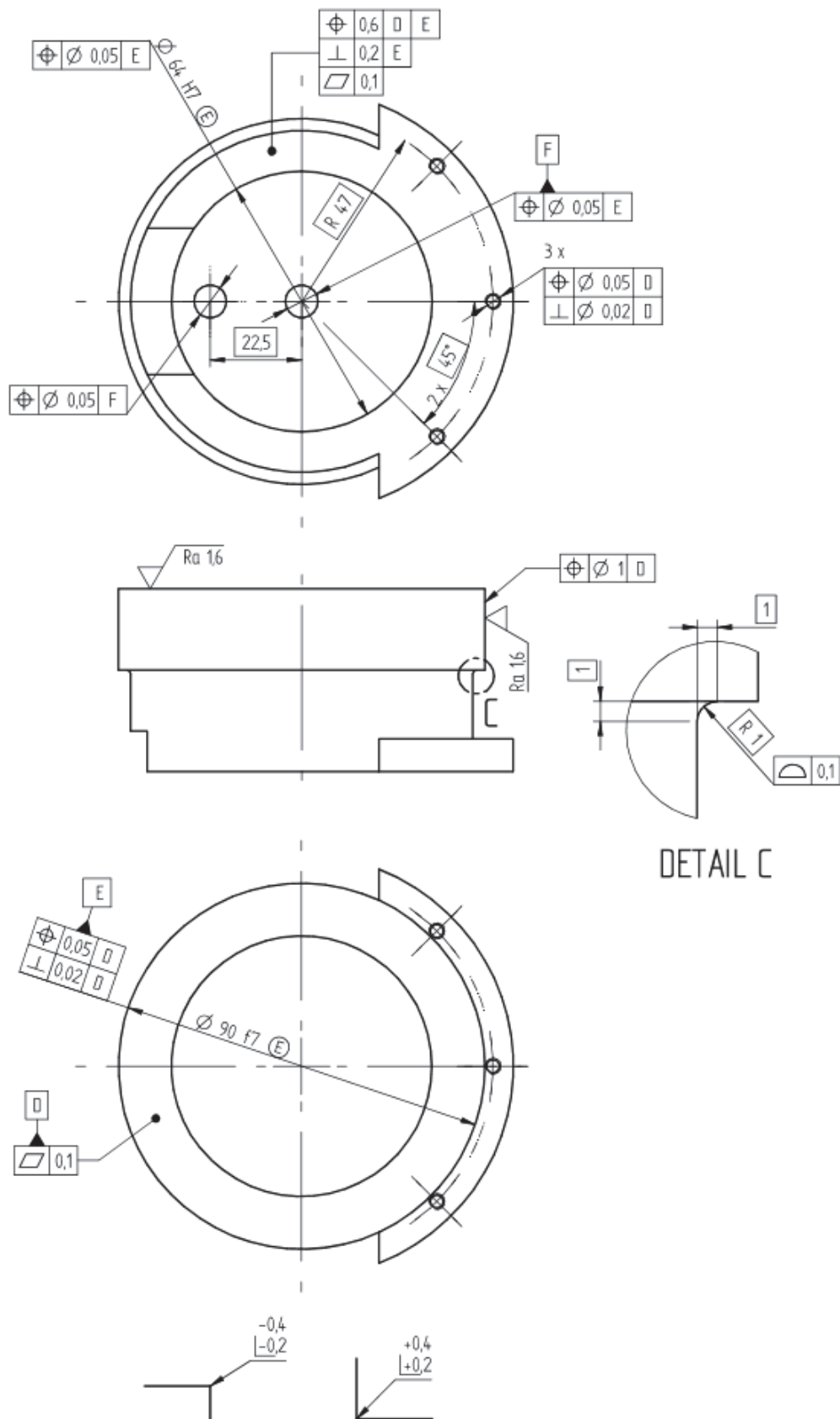
4.9. Celkové výkresy [8]

Obrázky 69, 70 a 71 ukazují hotové výkresy jednotlivých součástí se všemi požadavky na funkční vlastnosti jednotlivých součástí.

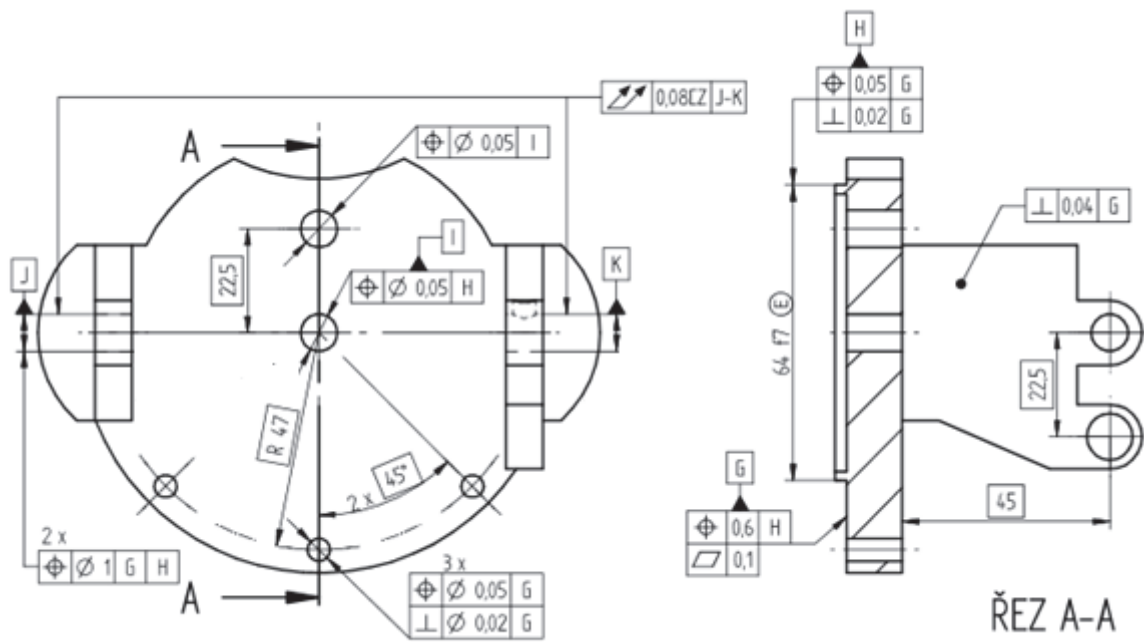
Technika tolerování 8bodovým tolerančním postupem IfGPS umožňuje předepsání velmi podrobných požadavků pro každou jednotlivou vlastnost součásti. Tím, že je několik tolerancí předepsaných pro každý prvek součásti, je možné kombinovat malé tolerance s mnoha nezamčenými (volnými) stupni volnosti s většími tolerancemi neodebraných stupňů volnosti. Výhodou tohoto předepisování je snadnější a levnější výroba než v případě předepisování pevných (fixních) tolerancí s malým tolerančním polem.



Obrázek 69 - Celkový výkres pro součást "upínací deska"



Obrázek 70 - Celkový výkres pro součást "podstava"



Obrázek 71 - Celkový výkres pro součást "otočný stůl"

5. Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo provést rešeršní činnost na téma problematiky GPS, která zahrnuje jednak tolerování pomocí rozměrových a geometrických tolerancí, ale také pravidla pro předepisování a značení jednotlivých tolerancí na výkresové dokumentaci. V současné době jsou strojní součásti ve většině podniků tolerovány pomocí rozměrových tolerancí a geometrické tolerance jsou většinou opomíjeny, proto se tato bakalářská práce snaží poukázat na možnosti tolerování strojních součástí pomocí tolerancí geometrických, neboť pomocí těchto tolerancí dochází k levnější a snadnější výrobě. Je zřejmé, že používání geometrických tolerancí pro tolerování strojních součástí vyžaduje na rozdíl od tolerování pomocí tolerancí rozměrových daleko více zkušeností a studia, neboť je důležité, aby konstruktér věděl, jaké geometrické tolerance použít pro jednotlivé součásti v závislosti na jejich funkčnosti, popřípadě jak velké předepsat toleranční pole u jednotlivých tolerancí. Používání geometrických tolerancí je podstatné především pro zachování funkčnosti součásti po procesu výroby, neboť je důležité, aby u funkčních ploch součásti byl dodržen správný tvar a správný rozměr.

Problematika GPS zahrnuje také systém GPS matrix, který řadí jednotlivé normy k tolerování do řetězců norem podle toho, do které části výrobního cyklu norma spadá.

Vedlejším cílem této bakalářské práce bylo provedení názorné ukázky používání systému GPS pro tolerování konkrétní sestavy součástí. Tolerování na této sestavě bylo provedeno pomocí tolerančního postupu IfGPS, který společně navrhli Per Bennich a Henrik Nielsen. Tento toleranční postup je rozdělen do osmi kroků, ve kterých jsou postupně předepisovány jednotlivé požadavky na součásti. Kromě předepisování geometrických tolerancí zahrnuje tento toleranční postup například předepisování tolerancí uložení a tolerance textury povrchu.

Používání geometrických tolerancí pro tolerování součástí je ve většině podniků stále na počátku, některé podniky však již začaly své výrobky vyrábět pomocí výkresových dokumentací s předepsanými geometrickými tolerancemi, což vede k snazší a přesnější výrobě a také ke zvýšení konkurenceschopnosti na mezinárodním trhu.

Použitá literatura

- [1] Drastík, F. Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem. MONTANEX, a.s. Ostrava 1996
- [2] HENZOLD, G. Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection. Elviesier Ltd. Oxford 2006
- [3] Leinveber, J., Vávra, P. Strojnické tabulky. ALBRA. Úvaly 2011. ISBN 978-80-7361-081-4
- [4] Skopal, M.J. Seminář GPS. FSI VUT v Brně. Brno 2007
- [5] Haberhauer, H. Tolerance Analysis – Future Propects
- [6] ISO 1101:2012. Geometrical tolerancing – Tolerances od from, orientation, location and run-out
- [7] Pešička, L., Mazínová, I. Konstrukční příručka. Rozměrové a geometrické tolerance na výkresech ve strojírenství podle mezinárodních norem ISO GPS. ZČU FST KKS. Plzeň 2013
- [8] The ISO Geometrical Product Specifications Handbook. Find your way in GPS. ISO/Danish Standarts. 2012
- [9] D'ANDREA U – TRONIC. Presentace podniku D'ANDREA U – TRONIC. 2009 Italy
- [10] Pešička, L., Skopal, J. Technická dokumentace a geometrická specifikace produktů (GPS). Český normalizační institut. Praha 2008
- [11] Pešička, L. Geometrická specifikace výrobků strojírenské výroby (GPS) – Textura povrchu. Český normalizační institut. Praha 2006
- [12] Ateam. Integrita povrchu obrobku. ZČU FST KMM. Plzeň 2014. Dostupné z:
- [13] ZČU FST KTO. Měření odchylek tvaru a polohy. Presentace
- [14] ZČU FST KTO. Stanovení nejistot měření. Presentace
- [15] Pešička, L., Skopal, J. Geometrická specifikace produktů (GPS). Český normalizační institut. Praha 2008
- [16] Gou, J.B., Chu, Y.X., Li, Z.X. A geometric theory of form, profile, and orientation tolerances. University of Science and Technology. Hong Kong 2000. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635998000282%20rovinnost,%20tvar,%20profil>
- [17] Nassef, A.O., ElMaraghy, H.A. Allocation of Geometric Tolerances: New Criterion and Methodology. University of Windsor, Ontario. Kanada 2007. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607607859#>
- [18] Skopal, J. Rozměrové a geometrické tolerance tvarovaných součástí. MM průmyslové spektrum v rubrice ČNI/EU a normalizace. 2008. Článek dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rozmerove-a-geometricke-tolerance-tvarovanych-soucasti.html>
- [19] Skopal, J. Nové publikace z oblasti Geometrické specifikace produktu. MM průmyslové spektrum v rubrice ČNI/EU a normalizace. 2008. Článek dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-publikace-z-oblasti-geometricke-specifikace-produktu.html>

[20] Metrology Consulting, Inc. Geometrical Product Specification. Dostupné z: <http://www.hn-metrology.com/gps.htm>

[21] Paul, J. Dimensioning and Tolerancing Handbook. McGraw-Hill, New York 1999

[22] Wikipedia. Geometric dimensioning and tolerancing. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Geometric_dimensioning_and_tolerancing

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Postup vytváření součásti od návrhu po vyhodnocení.....	7
Obrázek 2 - Ukázka tolerančního pole	10
Obrázek 3 - Požadavek na společné toleranční pole	10
Obrázek 4 - Toleranční rámeček	11
Obrázek 5 - Označení základny.....	11
Obrázek 6 - Příklady zápisu základen	12
Obrázek 7 - Toleranční pole a předpis přímosti	13
Obrázek 8 - Toleranční pole a předpis rovinnosti	14
Obrázek 9 - Toleranční pole a předpis kruhovitosti	14
Obrázek 10 - Toleranční pole a předpis válcovitosti.....	14
Obrázek 11 - Toleranční pole a předpis tvaru profilu	15
Obrázek 12 - Toleranční pole a předpis tvaru plochy	15
Obrázek 13 - Toleranční pole a předpis rovnoběžnosti.....	16
Obrázek 14 - Toleranční pole a předpis kolmosti.....	17
Obrázek 15 - Toleranční pole a předpis sklonu.....	17
Obrázek 16 - Toleranční pole a předpis umístění.....	18
Obrázek 17 - Toleranční pole a předpis souososti.....	18
Obrázek 18 - Toleranční pole a předpis souměrnosti	19
Obrázek 19 - Toleranční pole a předpis kruhového obvodového házení	19
Obrázek 20 - Toleranční pole a předpis kruhového čelního házení	20
Obrázek 21 - Toleranční pole a předpis celkového obvodového házení.....	20
Obrázek 22 - Toleranční pole a předpis celkového čelního házení.....	21
Obrázek 23 – Rozměrové tolerance	21
Obrázek 24 - Předpis požadavku kontroly obalovou plochou.....	22
Obrázek 25 - Předpis podmínky maxima materiálu	23
Obrázek 26 - Podmínka minima materiálu.....	24
Obrázek 27 - Předpis požadavku reciprocity.....	25
Obrázek 28 - Teoreticky přesné rozměry	26
Obrázek 29 - Negativní účinky na povrch součásti.....	27
Obrázek 30 – Skutečný povrch výrobku	27
Obrázek 31 - Digitální a analogový přístroj pro měření vlhkosti a teploty vzduchu	30
Obrázek 32 – Toleranční pole pro geometrickou toleranci umístění osy.....	33
Obrázek 33 - Tolerování polohy obdélníkového otvoru pomocí TEDs a tolerance polohy 34	

Obrázek 34 - Ukázka vynechání TED úhlu při daném TED roztečné kružnice.....	34
Obrázek 35 - Zvětšené toleranční pole při použití geometrických tolerancí a TEDs.....	35
Obrázek 36 - Různé způsoby kótování pro určení polohy otvorů.....	36
Obrázek 37 - Nesymetrické rozložení tolerančního pole	37
Obrázek 38 - Nerovnoměrné toleranční pole	38
Obrázek 39 - Možnosti použití tolerance profilu	38
Obrázek 40 - Tolerování pomocí geometrických tolerancí profilu.....	39
Obrázek 41- Tolerování pomocí rozměrových tolerancí.....	39
Obrázek 42 - Přípravek pro vlastní řešení	40
Obrázek 43 - Zkoumaná část přípravku	41
Obrázek 44 - Rozstřel.....	41
Obrázek 45 - Upínací deska	42
Obrázek 46 - Podstava.....	42
Obrázek 47 - Otočný stůl.....	43
Obrázek 48 - Funkční plochy součásti "upínací deska"	44
Obrázek 49 - Funkční plochy součásti "podstava"	45
Obrázek 50 - Funkční plochy součásti "otočný stůl"	46
Obrázek 51 - Vztažný systém pro součást „upínací deska“	48
Obrázek 52 - Vztažný systém pro součást „podstava“	48
Obrázek 53 - Vztažný systém pro součást „otočný stůl“	49
Obrázek 54 - Rozměrové tolerance pro součást „upínací deska“.....	50
Obrázek 55 - Rozměrové tolerance pro součást "podstava" (pohled shora a zdola).....	50
Obrázek 56 - Rozměrové tolerance pro součást "otočný stůl"	51
Obrázek 57 - Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro součást "upínací deska".....	52
Obrázek 58 - Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro součást "podstava"	53
Obrázek 59 - Umístění prvků s pevnými tolerancemi pro součást "otočný stůl".....	53
Obrázek 60 - Mobilní tolerance pro součást "podstava" (pohled shora a zdola)	54
Obrázek 61 - Mobilní tolerance pro součást "otočný stůl".....	54
Obrázek 62 - Nesouvisející tolerance pro součást "upínací deska".....	55
Obrázek 63 - Nesouvisející tolerance pro součást "podstava" (pohled shora a zdola).....	56
Obrázek 64 - Nesouvisející tolerance pro součást "otočný stůl"	56
Obrázek 65 - Kombinace tolerancí pro součást "otočný stůl".....	57
Obrázek 66 - Tolerance textury pro součást "upínací deska".....	58
Obrázek 67 - Tolerance textury povrchu pro součást "podstava"	59

Obrázek 68 - Tolerance hran pro součást "podstava".....	59
Obrázek 69 - Celkový výkres pro součást "upínací deska".....	60
Obrázek 70 - Celkový výkres pro součást "podstava"	61
Obrázek 71 - Celkový výkres pro součást "otočný stůl"	62

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Rozdělení geometrických tolerancí.....	12
Tabulka 2 - Parametry pro hodnocení povrchu	28
Tabulka 3 - Dosahované drsnosti povrchu pro jednotlivé operace obrábění	29
Tabulka 4 - Dosahované drsnosti vrtání pro rozdílné průměry a délky otvorů.....	29
Tabulka 5 - Hodnota koeficientu k_A v závislosti na počtu měření	31