



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ZPŮSOBY MĚŘENÍ GEOMETRICKÝCH TOLERANCÍ

METHODS FOR MEASURING THE GEOMETRICAL TOLERANCES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bára Juráňová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Studentka: **Bára Juránová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Způsoby měření geometrických tolerancí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aplikace geometrických tolerancí umožňuje srozumitelně popsat tvarovou přesnost součástí a kontrolovat přesnost výroby. K měření geometrických tolerancí se převážně používají optické a bodové metody nebo jednoduché přístroje a jejich kombinace. Popis jednotlivých způsobů a variant měření geometrických tolerancí podpoří pochopení problematiky geometrických tolerancí ve výuce konstrukčních předmětů.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je rešerše v oblasti měření a vyhodnocování geometrických tolerancí včetně aplikace poznatků pro měření geometrických tolerancí na vybraném vzorku.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popsat definice geometrických tolerancí a principy pro jejich měření a vyhodnocení dle aktuálních norem,
- popsat vztah mezi geometrickými a délkovými tolerancemi,
- popsat měřicí přístroje a měřidla pro měření geometrických tolerancí včetně doporučení pro konkrétní případy,
- aplikovat vybrané metody měření a vyhodnocení pro konkrétní vzorek.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 1101 (01 4120): Geometrické specifikace výrobků (GPS) - Geometrické tolerování – Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

ČSN EN ISO 8015 (01 4204): Geometrické specifikace produktu (GPS) - Základy – Pojmy, principy a pravidla. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

ČSN ISO 2768-2: Všeobecné tolerance Část 2: Nepředepsané geometrické tolerance. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994.

ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. Strojírenská metrologie I. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-802-1440-104.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá rozбором geometrického tolerování strojních součástí. V této práci jsou objasněny pojmy a definice spojené s geometrickým tolerováním, rozebrány metody měření jednotlivých geometrických tolerancí spolu s popisem měřicích přístrojů a měřidel. Je zde také navržena metoda pro volbu geometrických tolerancí, která je aplikována na hřídeli radiálního ventilátoru. Následně je popsáno měření předepsaných tolerancí pro tuto součást.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tolerance, závislé tolerance, úchylkoměr, hřídel radiálního ventilátoru

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the analysis of geometric tolerancing of machine parts. The work clarifies the terms and definitions of geometric tolerancing. Simultaneously, the specifications of measuring with measuring devices and gauges, can be found here. The work also proposes a method for application geometric tolerance, which is applied to the shaft of radial fan. Subsequently, the measurement of the prescribed tolerances for this part is described.

KEYWORDS

Tolerance, dependent tolerances, dial indicator, shaft of radial fan

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JURÁŇOVÁ, Bára. *Způsoby měření geometrických tolerancí*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121793>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala doc. Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky během tvorby mé bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala své rodině za velkou trpělivost a neustálou podporu během mého dosavadního studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Petra Svobody, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpala, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Bára Juráňová

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	14
2.1	Analýza problému	14
2.2	Cíl práce	16
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
3.1	Základní pojmy pro geometrické tolerance	17
3.1.1	Toleranční pole	17
3.1.2	Toleranční rámeček	18
3.1.3	Základna	19
3.1.4	Teoreticky přesné rozměry	21
3.2	Rozdělení geometrických tolerancí	22
3.3	Tolerance tvaru	23
3.3.1	Tolerance přímosti	23
3.3.2	Tolerance rovinnosti	23
3.3.3	Tolerance kruhovitosti	24
3.3.4	Tolerance válcovitosti	24
3.3.5	Tolerance profilu čáry	24
3.3.6	Tolerance profilu plochy	25
3.4	Tolerance orientace	26
3.4.1	Tolerance rovnoběžnosti	26
3.4.2	Tolerance kolmosti	28
3.4.3	Tolerance sklonu	29
3.5	Tolerance umístění	32
3.5.1	Tolerance polohy	32
3.5.2	Tolerance soustřednosti a souososti	33
3.5.3	Tolerance souměrnosti	34
3.6	Tolerance házení	35
3.6.1	Tolerance kruhového házení	35
3.6.2	Tolerance celkového házení	37
3.7	Měření geometrických tolerancí	38
3.7.1	Měření tolerancí užitím konvenčních metod	38
3.7.2	Nekonvenční metody měření	44
3.7.3	Chyby vznikající při měření	47

3.8	Rozměrové tolerance a textura povrchu	48
3.8.1	Rozměrové tolerance	48
3.8.2	Drsnost povrchu	50
3.8.3	Vzájemná závislost tolerancí	51
3.9	Závislé tolerance	53
3.9.1	Požadavek obalové plochy	53
3.9.2	Požadavek maxima materiálu	54
3.9.3	Požadavek minima materiálu	54
3.9.4	Požadavek reciprocity	55
3.10	Všeobecné geometrické tolerance	56
4	DISKUZE	57
4.1	Obecná metoda pro volbu geometrických tolerancí	57
4.2	Aplikace geometrických tolerancí na konkrétní součást	58
4.2.1	Specifikace vybrané součásti	58
4.2.2	Volba vhodných geometrických tolerancí	59
4.3	Kontrola předepsaných geometrických tolerancí	62
4.3.1	Popis měření geometrických tolerancí	62
4.3.2	Vyhodnocení kontrolované součásti	65
5	ZÁVĚR	66
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	67
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	70
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	71
9	SEZNAM PŘÍLOH	74

1 ÚVOD

V současné době rychle se rozvíjejícího průmyslu, je kladen velký nátlak na rychlost, cenu a dokonalost výroby. Za přispění těchto požadavků bylo vytvořeno značné množství nových technologií, které se podílejí na velkých pokrocích v oblasti strojírenství. Dochází k nahrazování lidské práce za strojní. Ta je schopna daleko rychlejší a přesnější výroby.

Při výrobě však stále vznikají nepřesnosti, které jsou dány zvolenou technologií výroby nebo lidským faktorem. Skutečný tvar a rozměr součástí se musí nacházet v určitých mezích. Tuto mez nám udává tolerování, díky čemuž je možná zaměnitelnost součástí při opravách. Opravy následně probíhají rychleji a je možné použít i součásti od jiných výrobců.

Při výrobě je nutné dodržet požadovanou drsnost povrchu spolu s rozměrovými a geometrickými tolerancemi. Úchyly jednotlivých tolerovaných prvků mohou ovlivnit funkci strojů a jejich součástí. Velmi nepříznivé jsou úchyly válcovitosti a kruhovitosti, které způsobují hlučnost chodu. U obráběcích strojů je důležité dodržení tolerancí přímosti, rovnoběžnosti a kolmosti vodících ploch. Tyto parametry ovlivňují přesnost stroje a následně i přesnost výsledného výrobku.

Tolerování vychází z velkého množství norem, které obsahují přesnou definici značení ve výkresové dokumentaci apod. Výchozí normou pro volbu geometrických tolerancí je ČSN EN ISO 1101, která umožňuje konstruktérům sdělovat požadavky na přesnost výroby s důrazem na funkci součástí.

Studenti bakalářského programu na fakultě strojního inženýrství navštěvují předměty konstruování, kde není dostatečný prostor pro důkladné rozebrání problematiky geometrických tolerancí. Tato práce by měla pomoci studentům tuto problematiku vysvětlit.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

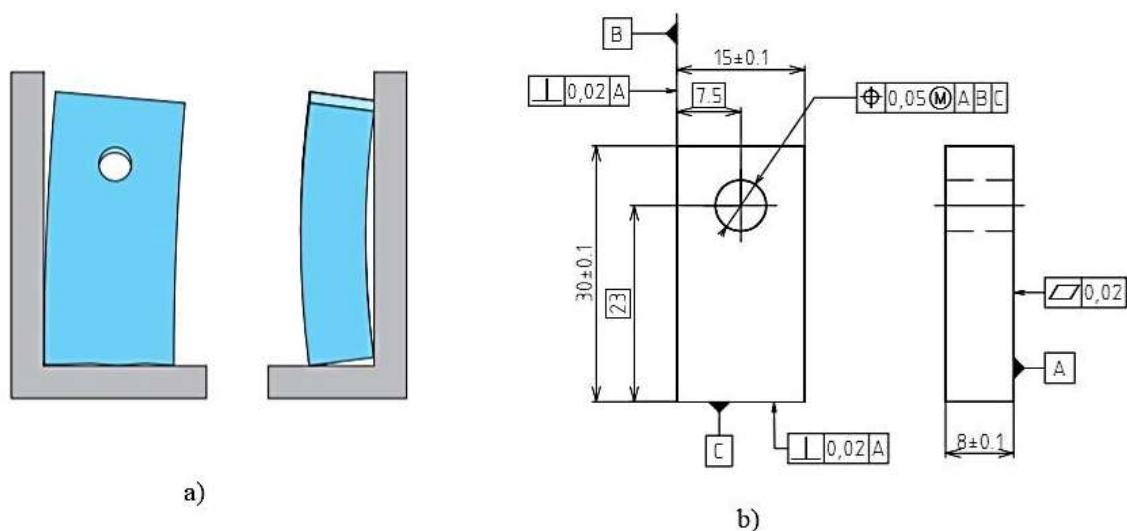
Výrazné problémy v oblasti kvality vyrobených součástí vznikají v důsledku špatné volby rozměrů a tolerancí. Převážná část těchto problémů nastává kvůli nesprávnému pochopení a užití systému tolerování. Abychom předešli těmto komplikacím, je pro konstruktéra nutná dokonalá znalost všech norem, které spadají do souboru geometrických specifikací produktu (GPS). Další důležité faktory, ovlivňující předpis tolerancí, jsou jeho zkušenosti a vědomosti týkající se výroby součástí.

V současné době není možná výroba součástí s úplnou přesností tvaru a rozměru. Každá vyrobená součást má tedy odchylku, která vzniká zvoleným způsobem výroby nebo lidským faktorem. Eliminace jejich velikostí se provádí pomocí předpisu tolerancí do výkresové dokumentace. Tolerance součásti je definována jako maximální možná odchylka od ideálního tvaru součásti, bez ohrožení správné funkce a kvality [1]. Její dovolená velikost určuje ekonomickou náročnost výroby.

V současné době existuje velké množství mezinárodních norem zabývajících se GPS. Součástí tohoto souboru jsou normy týkající se rozměrových a geometrických tolerancí pro zajištění správné funkce součástí, jejich výroby, kontroly a montáže. Dále normy týkající se textury povrchu součástí a normy týkající se měřicích prostředků, postupů a vyhodnocení měření [2]. Jejich hlavní myšlenkou je skutečnost, že všechny tolerované součásti mohou být hodnoceny z hlediska své kvality celosvětově. Bohužel pro člověka pohybujícího se mimo praxi, začíná být technická dokumentace zcela nepřehledná.

Důležitou prací konstruktéra, je účelné definování všech možných výrobních odchylek od ideálního tvaru. Předpis tolerancí je však velmi obtížný, jelikož předepsané tolerance musí mít vztah k funkci součásti, být vyrobitelné a opakovatelně měřitelné. Dalším faktorem pro volbu tolerance je skutečná potřebná přesnost. Přehnaně malá předepsaná úchylna, i když by ji výrobní stroje zvládly vyrobit, je zbytečnou finanční zátěží [3].

Je třeba si uvědomit, že součást s pouze okótovanými rozměry, bude vyrobena s daleko menší přesností oproti součásti, která bude mít předepsané rozměrové i geometrické tolerance [4]. Na obr. 2-1a lze vidět součást, která byla vyrobena bez dodržení předepsaných rozměrových a geometrických tolerancí. V důsledku nedokonale rovných stran, je prakticky nemožné určit střed pro vyvrtání díry, která by následně pasovala s protikusem. Toto dilemma řeší rozměrové a geometrické tolerance, jejichž předpis u této součásti lze vidět na obr. 2-1b. Po vyrobění této součásti, dle předepsaných hodnot, nebude problém spojit součást s protikusem.



obr. 2-1 Využití tolerancí; a) vyrobená součást bez využití jakýchkoliv tolerancí; b) příklad předpisu tolerancí pro zpřesnění výroby [4]

2.2 Cíl práce

Hlavním cílem mé bakalářské práce je zpracovat rešerši v oblasti měření a vyhodnocování geometrických tolerancí a současně tyto poznatky aplikovat na vybraném vzorku.

Mezi dílčí cíle této práce patří popis jednotlivých geometrických tolerancí a vyhodnocení jejich správnosti dle normy ČSN EN ISO 1101 vydané v roce 2017, popis konvenčních a nekonvenčních měřících strojů a přístrojů včetně doporučení pro aplikaci v konkrétních případech, popis vztahu mezi geometrickými a délkovými tolerancemi a následná aplikace poznatků metod měření a vyhodnocení na konkrétním vzorku.

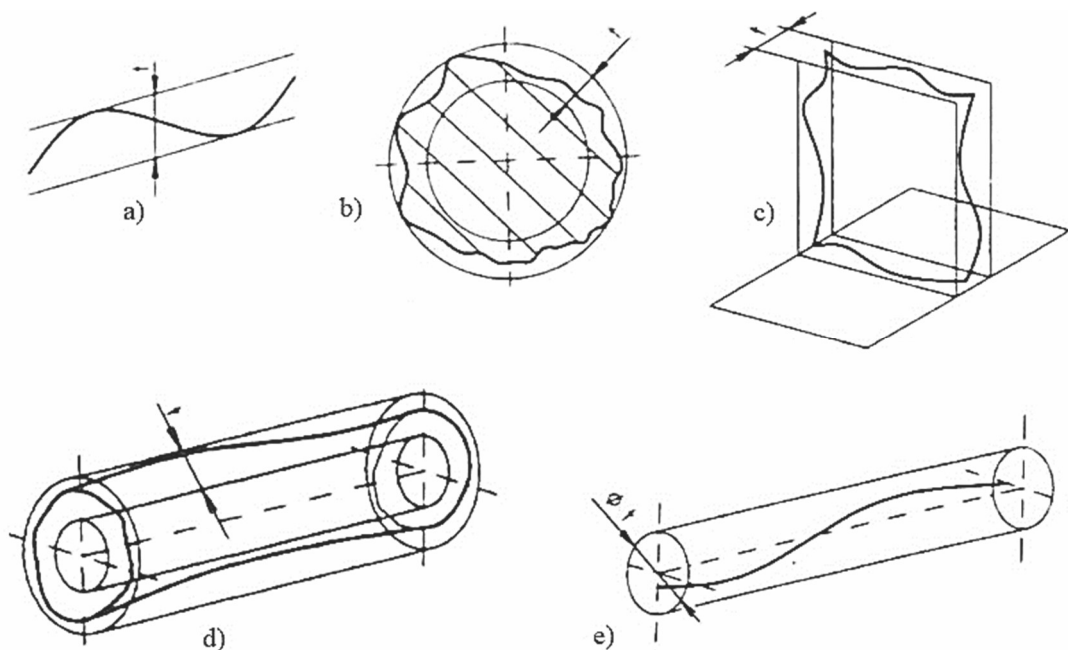
3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Základní pojmy pro geometrické tolerance

Z důvodu zvyšování přesnosti strojírenské výroby, rozšiřování výrobní kooperace a snadnější montáže vzniklo geometrické tolerování [5]. To nám definuje přípustnou velikost odchylky skutečného tvaru a polohy od tvaru a polohy teoreticky přesné. Geometrické tolerance se předepisují se v případech, kdy jsou nezbytně důležité pro funkci součásti. Pro správnou funkci součásti, musí všechny body skutečného tvaru ležet v tolerančním poli o velikosti „t“. V případě, že není geometrická tolerance předepsána, je celá součást tolerována dle všeobecných tolerancí řízených normou ČSN EN ISO 2768-2.

3.1.1 Toleranční pole

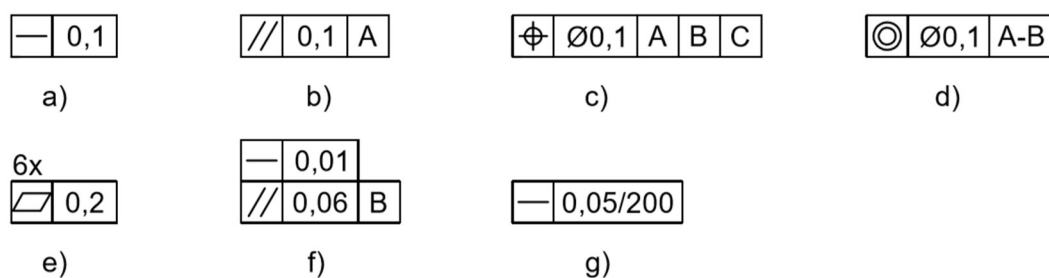
Toleranční pole je definováno jako prostor vymezený geometricky dokonalými čarami nebo povrchy, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu velikosti tolerance. Skutečný tvar prvku se poté musí nacházet v tomto vymezeném prostoru. Jeho velikost je závislá na požadované přesnosti výroby. V závislosti na druhu tolerovaného prvku má toto pole různý tvar. V rovině se vyskytuje toleranční pole tvořené dvěma přímkami (obr. 3-1a) nebo mezikružím (obr. 3-1b). V prostoru je toleranční pole tvořeno dvěma rovnoběžnými rovinami (obr. 3-1c), dvěma souosými válci (obr. 3-1d) nebo jedním válcem (obr. 3-1e).



obr. 3-1 Příklady tolerančních polí; toleranční pole tvořeno a) dvěma přímkami; b) mezikružím; c) dvěma rovinami; d) dvěma souosými válci; e) válcem [5]

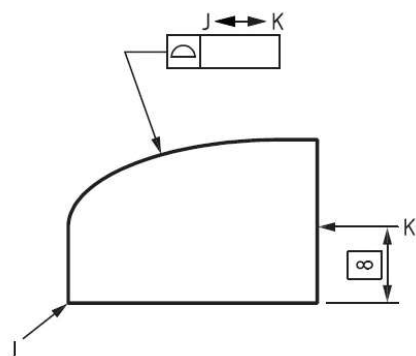
3.1.2 Toleranční rámeček

Geometrické tolerance se na výkres předepisují do rámečků, které se v závislosti na druhu tolerance skládají ze dvou nebo třech polí. V prvním čtvercovém poli vždy nalezneme značku geometrické tolerance a v druhém poli nalezneme číselnou hodnotu velikosti tolerančního pole v milimetrech (obr. 3-2a). Při předpisu válcového nebo kruhového tolerančního pole se před velikost tolerance uvádí symbol průměru „ $\varnothing$ “ [6]. V případě požadavku kulového tolerančního pole, se uvádí před velikost tolerance „S $\varnothing$ “. Poslední pole rámečku je variabilní a může být rozděleno na maximálně tři další části. V praxi je možné se setkat s různými předpisy, např. pole sloužící pro předpis jedné základny (obr. 3-2b), soustavy až tří základen (obr. 3-2c) nebo společné základny (obr. 3-2d). Další možnosti, jak předepsat geometrické tolerance lze vidět na obr. 3-2e, kdy se tolerance rovinnosti vztahuje k více prvkům. Předpis na obr. 3-2f platí v případě, kdy pro jeden prvek platí více tolerancí. Pokud je potřeba, aby tolerance platila pouze omezenou délkou, je možné ji předepsat dle obr. 3-2g.



obr. 3-2 Možnosti předpisu tolerančních rámečků

Další možnost předpisu je zobrazena na obr. 3-3. Hodnota tolerance je konstantní po celé délce uvažovaného prvku, pokud není grafickým označením „ $\leftrightarrow$ “ dáno jinak. Tuto skutečnost lze vidět právě na obr. 3-3, kde je užití geometrické tolerance profilu plochy pouze mezi body J a K [6].

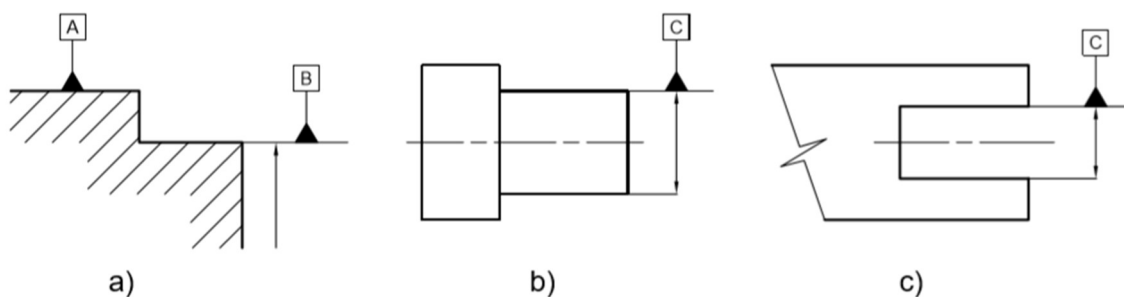


obr. 3-3 Příklad omezení tolerance mezi body J a K [6]

3.1.3 Základna

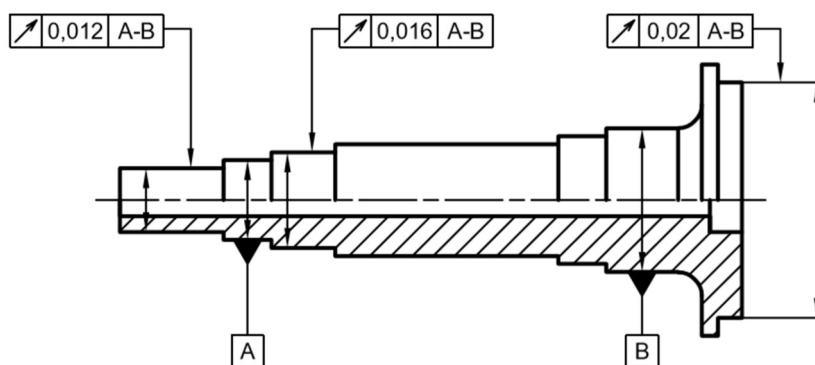
Základna je definována jako teoreticky přesný prvek, ke kterému je vztažena geometrická tolerance, a proto je jako základna velmi často volena osa rotační součásti [5]. Předepisuje se pouze u tolerancí vztahující se ke dvěma nebo více prvkům. Na výkrese se vyznačuje pomocí čtvercového pole, kde je označena velkým písmenem abecedy a s tolerovaným prvkem je spojena pomocí odkazové čáry.

V závislosti na požadavku tolerovaného prvku je možné umístit základnu různými způsoby. Umístíme-li ji na obrysovou čáru prvku nebo její prodloužení, bude jako základna považována čára nebo plocha (obr. 3-4a). Dalším způsobem předpisu je umístění základny na prodlouženou kótovací čáru. V tomto případě bude jako základna považována osa rotační součásti (obr. 3-4b) nebo rovina souměrnosti (obr. 3-4c) [5].



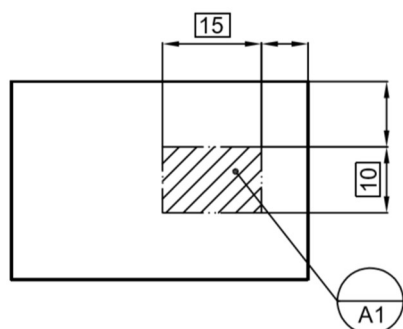
obr. 3-4 Možnosti umístění základny; a) na obrysovou čáru; b), c) na kótovací čáru

Základna může být tvořena jedním nebo více prvky [5]. Pokud je tvořena jedním prvkem, označí se ve třetím poli tolerančního rámečku jedním velkým písmenem. V případě, že společnou základnu tvoří dva prvky, je označena dvěma velkými písmeny oddělenými pomlčkou (obr. 3-5).



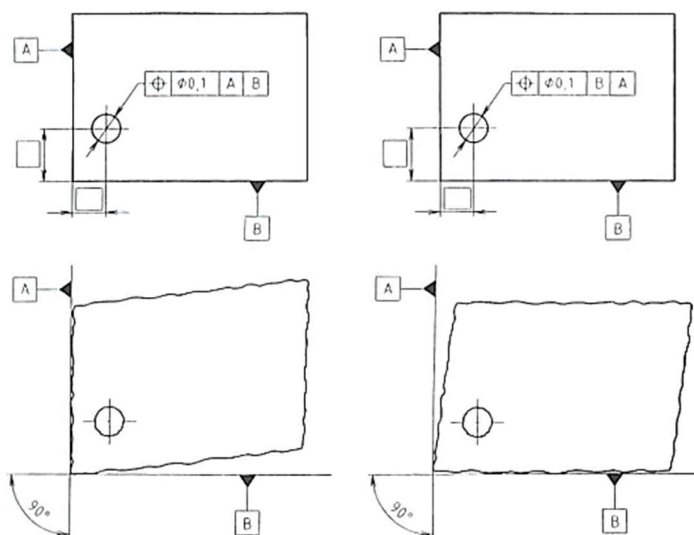
obr. 3-5 Společná základna tvořená dvěma prvky [5]

V případě, kdy základnu tvoří rozsáhlá plocha, je vhodné využít cílenou základnu. Vlivem nepřesnosti výroby by se prvek základny mohl lišit od ideálního tvaru a při opakovaných měřeních by docházelo k různým výsledkům. Cílená základna může být tvořena bodem, úsečkou nebo malou plochou (obr. 3-6) [5]. Tato základna se značí kruhem, který je rozdělen na dvě poloviny. Poloha je určena kótami jejíž rozměr se považuje za teoreticky přesný rozměr.



obr. 3-6 Předpis cílené základny tvořené malou plochou

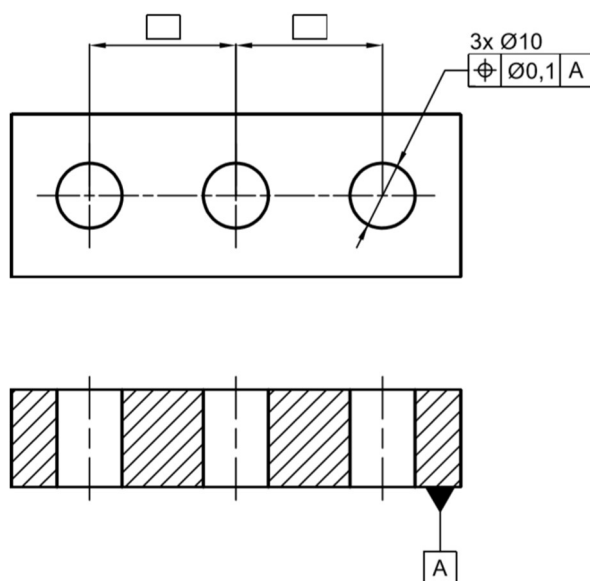
Speciálním případem jsou soustavy základen. Mají dvě, obvykle tři základny, ke kterým se musí předepsané tolerance splnit odděleně. Pořadí zápisu základen do tolerančního rámečku je dáno důležitostmi z hlediska funkce součásti. Současně toto pořadí ovlivňuje výsledky měření geometrických úchylek (obr. 3-7) [5]. Pro toleranci rovnoběžnosti, kolmosti a sklonu obvykle stačí předepsání jedné nebo dvou základen. Především u tolerance polohy je nutné mít soustavu základen tvořenou třemi vzájemnými rovinami.



obr. 3-7 Rozdíl v měření při změně základen [5]

3.1.4 Teoreticky přesné rozměry

Teoreticky přesné rozměry jsou ty, které se svou úchytkou blíží k nule. Nejčastější využití jejich předpisu je u tolerování polohy přesných prvků, například u děr pro šrouby na společné ose (obr. 3-8), nebo na roztečné kružnici. Jelikož toleranční pole je vždy symetricky rozloženo kolem teoreticky přesné polohy, nedochází ke sčítání tolerance prvků uspořádaných v ose [5]. Tento rozměr je zapsán v rámečku, jehož hodnota může mít velikost délkovou nebo úhlovou. Úhly 0° , 90° , 180° a 270° se jako teoreticky přesný rozměr neoznačují.



obr. 3-8 Příklad předpisu teoreticky přesných rozměrů

3.2 Rozdělení geometrických tolerancí

Geometrické tolerance se dají rozdělit do několika skupin podle toho, jaký prvek tolerují, což je znázorněno na obr. 3-9 níže.

Tolerance		Značka	
Tvaru	Přímosti	—	Ne
	Rovinnosti		Ne
	Kruhovitosti		Ne
	Válcovitosti		Ne
	Tvaru profilu		Ano\Ne
	Tvaru plochy		Ano\Ne
Orientace	Rovnoběžnosti		Ano
	Kolmosti		Ano
	Sklonu		Ano
Polohy	Umístění		Ano
	Soustřednosti a souososti		Ano
	Souměrnosti		Ano
Házení	Kruhového		Ano
	Celkového		Ano

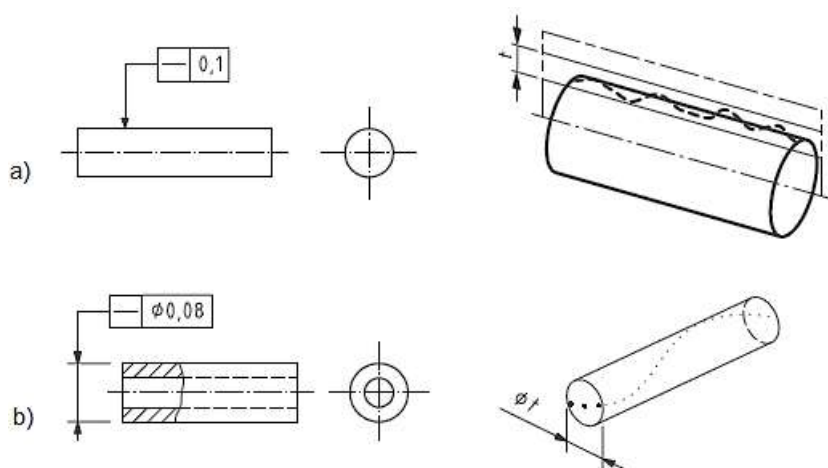
obr. 3-9 Rozdělení geometrických tolerancí

3.3 Tolerance tvaru

3.3.1 Tolerance přímosti

Pro tolerování přímosti v rovině je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými přímkami, které jsou od sebe vzdáleny o velikost tolerance „t“ [5]. Skutečná přímka prvku musí ležet mezi nimi.

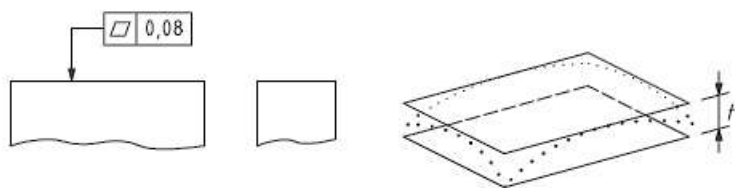
U tolerování povrchu válce může být toleranční pole vymezeno dvěma způsoby. Prvním způsobem je vymezení tolerančního pole pomocí dvou rovnoběžných rovin vzdálených od sebe o velikost tolerance „t“ (obr. 3-10a) [5]. Druhý způsob vymezení je pomocí válce, jehož průměr má velikost tolerance „t“. Skutečná přímka (osa) musí taktéž ležet v tomto tolerančním poli. V případě užití druhého způsobu, je nutné předepsání symbolu průměru „Ø“ před hodnotu velikosti tolerance (obr. 3-10b) [6].



obr. 3-10 Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci přímosti; a) dvěma rovinami; b) válcem [6]

3.3.2 Tolerance rovinnosti

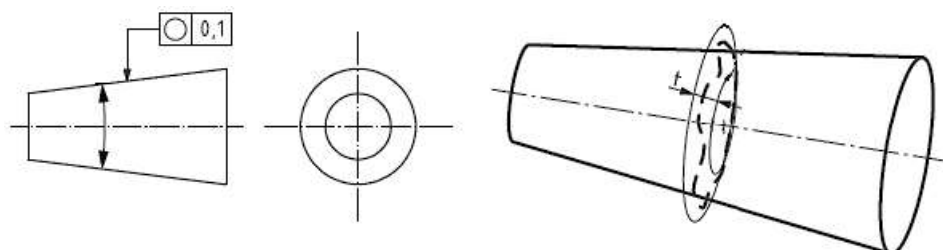
Pro tolerování rovinnosti prvku je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“ (obr. 3-11) [6]. Skutečná rovina se poté musí nacházet v tomto vymezeném poli.



obr. 3-11 Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci rovinnosti [6]

3.3.3 Tolerance kruhovitosti

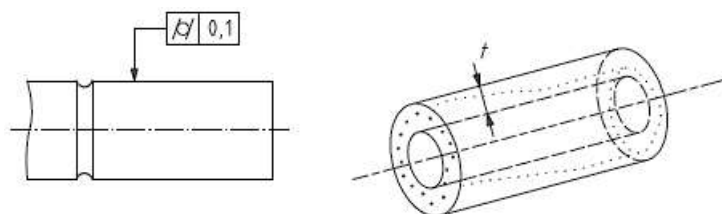
Pro toleranci kruhovitosti je toleranční pole vymezeno dvěma soustřednými kružnicemi (obr. 3-12). Menší z těchto kružnic leží na povrchu tolerovaného prvku. Druhá kružnice má oproti ní svůj poloměr větší o velikost předepsané tolerance [6]. Skutečný obvodový profil, ve kterémkoliv svém průřezu, musí vždy ležet mezi těmito kružnicemi ležícími ve stejné rovině.



obr. 3-12 Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci kruhovitosti [6]

3.3.4 Tolerance válcovitosti

Pro toleranci válcovitosti je toleranční pole vymezeno dvěma souosými válci (obr. 3-13) [6]. Rozdíl jejich poloměrů se rovná velikosti tolerance „t“. Skutečná válcová plocha prvku musí ležet mezi těmito válci.



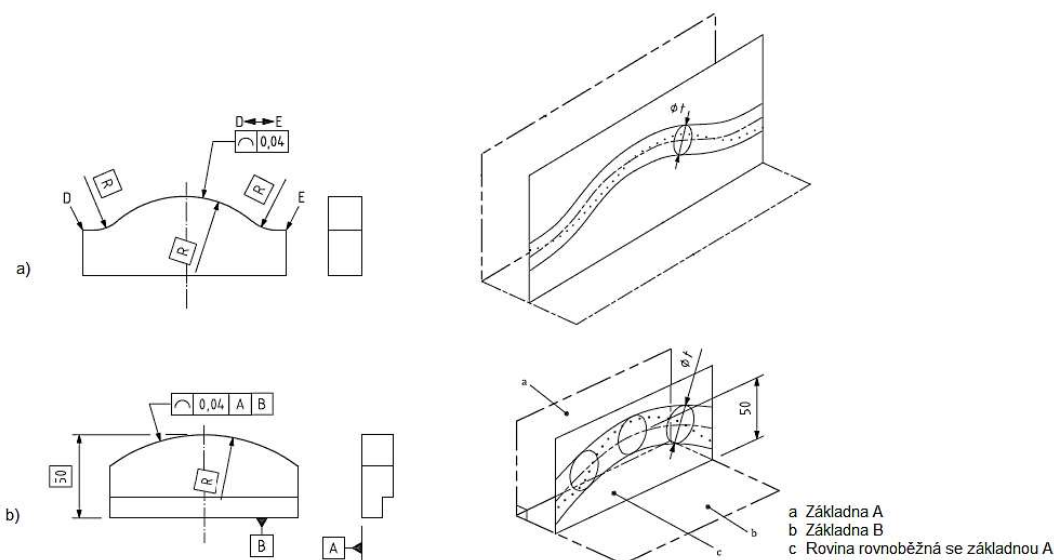
obr. 3-13 Předpis a vymezení tolerančního pole toleranci válcovitosti [6]

3.3.5 Tolerance profilu čáry

Tato tolerance může a nemusí být vztažena k základně. Díky tomu se zde vyskytují dva možné způsoby předpisu.

V případě tolerování profilu čáry nevztažené k základně je toleranční pole vymezeno dvěma ekvidistantními čarami, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu tolerance o velikosti „t“ (obr. 3-14a) [6]. Skutečná čára profilu musí ležet v tolerančním poli v každém průřezu prvku, ve kterém je úchylka předepsána.

Pro tolerování profilu čáry vztažené k základně je toleranční pole vymezeno čarou tvořenou středy kružnic s geometricky přesným středem (obr. 3-14b) [6].



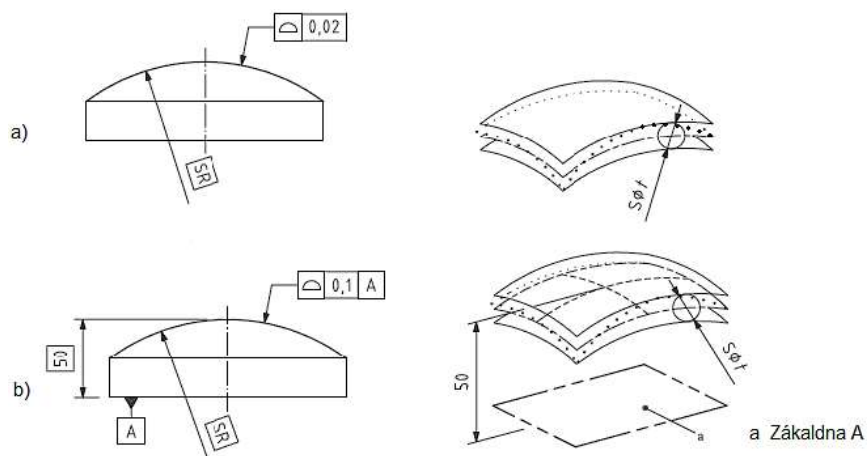
obr. 3-14 Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci profilu čáry; a) pro prvek nevztahený k základně; b) pro prvek vztahený k základně [6]

3.3.6 Tolerance profilu plochy

Obdobně jako předchozí tolerance, je možné toleranci profilu plochy předepsat jako vztahenou nebo nevztahenou k základně. Díky tomu se zde opět vyskytují dva možné způsoby předpisu.

Pro tolerování profilu plochy nevztahené k základně je toleranční pole vymezeno dvěma ekvidistantními křivkami, které jsou tvořeny plochami koulí s průměrem velikosti tolerance „t“ (obr. 3-15a) [6]. Koule jsou soustředné a jejich středy leží na povrchu prvku s geometricky přesným tvarem. Skutečná plocha profilu musí ležet v tolerančním poli.

U tolerování profilu plochy vztahené k základně je toleranční pole vymezeno plochou tvořenou středy koulí s geometricky přesným středem (obr. 3-15b) [6].



obr. 3-15 Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci profilu plochy; a) pro prvek nevztahený k základně; b) pro prvek vztahený k základně [6]

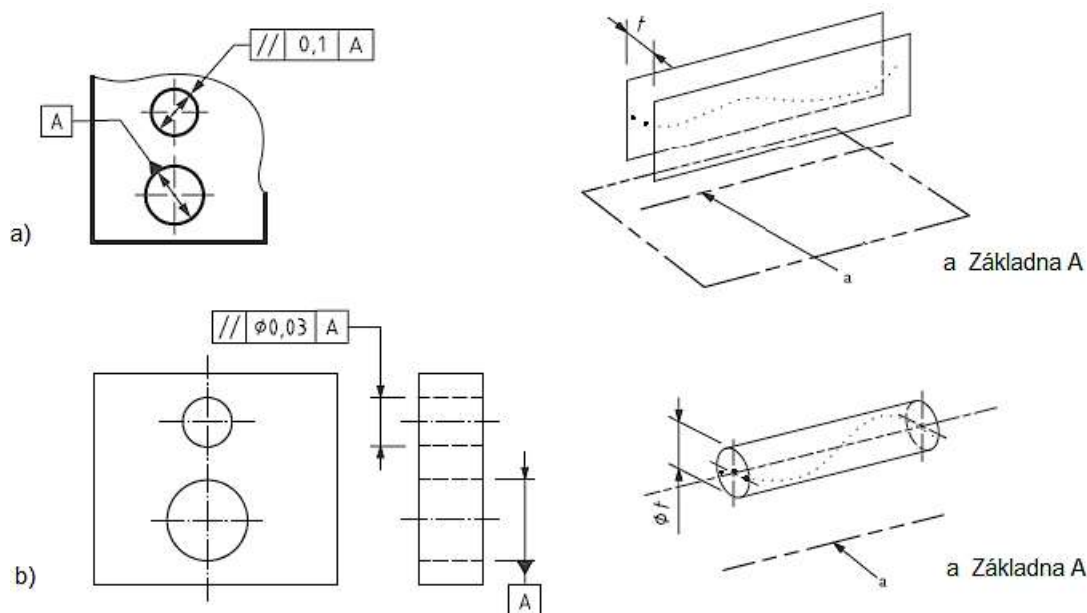
3.4 Tolerance orientace

3.4.1 Tolerance rovnoběžnosti

Toleranci rovnoběžnosti můžeme rozdělit do čtyř možných podskupin, podle toho, jaký použijeme v předpisu prvek a jakou základnu.

Přímka k základně tvořené přímkou

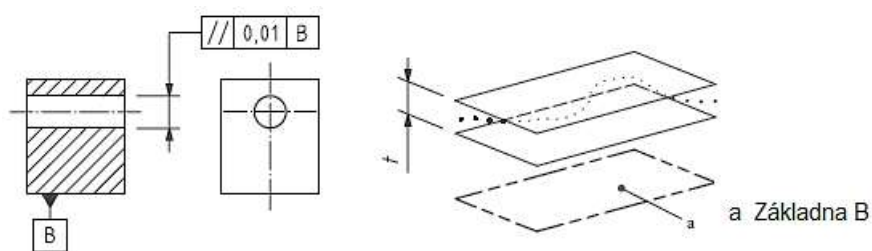
Pro tolerování dvou přímek, nejčastěji os, využíváme toleranční pole vymezené dvěma rovnoběžnými rovinami (obr. 3-16a), které vedou ve směru kóty, k níž toleranci předepisujeme. Vzdálenost mezi rovinami je rovna velikosti tolerance „t“ [6]. V případě předpisu symbolu průměru „ $\varnothing$ “ před velikostí tolerance, je toleranční pole vymezeno válcem o průměru „t“ (obr. 3-16b), který je rovnoběžný se základnou. Skutečná osa prvku poté musí ležet ve vymezeném poli.



obr. 3-16 Předpis a vymezení tolerančního pole pro rovnoběžnost přímky k základně tvořené přímkou; a) dvěma rovinami; b) válcem [6]

Přímka k základně tvořené plochou

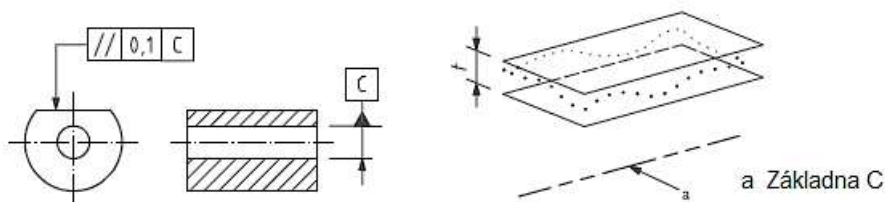
Pro tolerování přímky k základně tvořené plochou je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdáleny o velikost tolerance „t“ (obr. 3-17) [6]. Tyto roviny musí být rovnoběžné se základnou. Nejčastěji se tento druh tolerování využívá pro vzájemnou rovnoběžnost plochy s osou díry. Skutečná osa prvku se musí nacházet mezi těmito rovinami.



obr. 3-17 Předpis a vymezení tolerančního pole pro rovnoběžnost přímky k základně tvořené plochou [6]

Plocha k základně tvořené přímkou

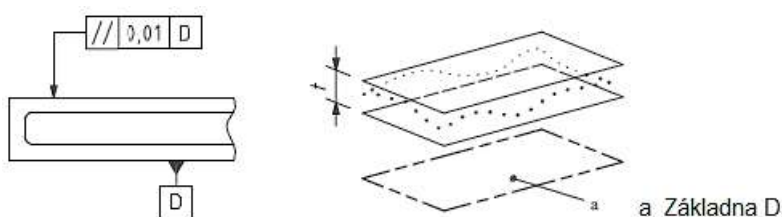
Pro tolerování plochy k základně tvořené přímkou je toleranční pole vymezené dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“ (obr. 3-18) [6]. Roviny musí být opět rovnoběžné se základnou. Skutečná plocha musí ležet v tolerančním poli a zároveň musí být rovnoběžná se střední čarou.



obr. 3-18 Předpis a vymezení tolerančního pole pro rovnoběžnost plochy k základně tvořené přímkou [6]

Plocha k základně tvořené plochou

Pro tolerování plochy k základně tvořené plochou je toleranční pole opět vymezené dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“ (obr. 3-19) [6]. Stejně jako v předchozím případě, roviny musí být také rovnoběžné se základnou. Skutečná plocha musí opět ležet v tomto vymezeném poli.



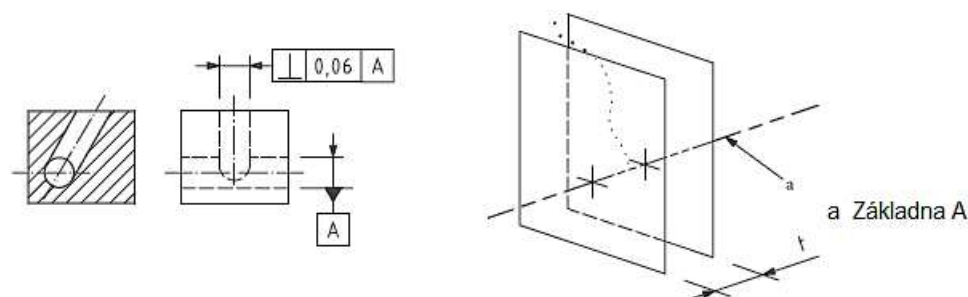
obr. 3-19 Předpis a vymezení tolerančního pole pro rovnoběžnost plochy k základně tvořené plochou [6]

3.4.2 Tolerance kolmosti

Toleranci kolmosti, stejně jako toleranci rovnoběžnosti, můžeme rozdělit do čtyř možných podskupin podle toho, jaký použijeme v předpisu prvek a jakou základnu.

Přímka k základně tvořené přímkou

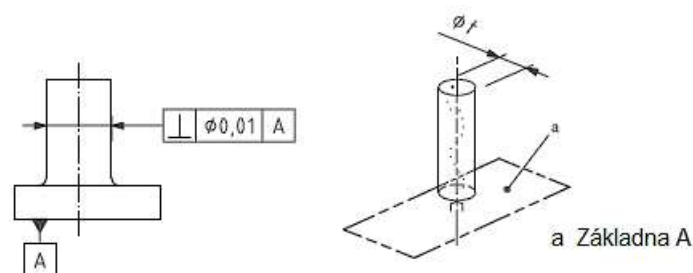
Pro tolerování dvou přímek je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“ (obr. 3-20) [6]. Toto pole musí být kolmé na přímku základny. Nejčastěji se tento druh tolerování využívá pro osy děr. Skutečná osa prvku se musí nacházet ve vymezeném poli.



obr. 3-20 Předpis a vymezení tolerančního pole pro kolmost přímky k základně tvořené přímkou [6]

Přímka k základně tvořené plochou

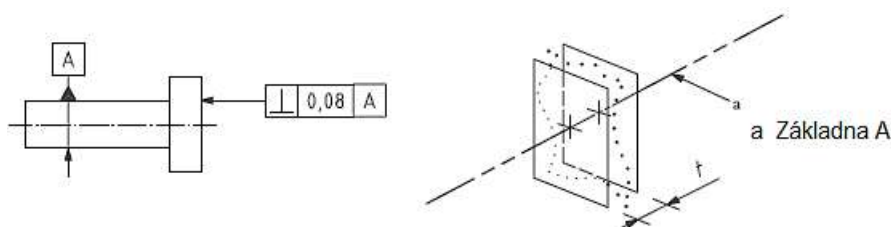
Pro tolerování přímky k základně tvořené plochou je toleranční pole vymezeno válcem s průměrem tolerance „t“. Je nutné, aby před číselnou hodnotou tolerance byl uveden symbol průměru „Ø“ (obr. 3-21) [6]. V případě, že tento symbol předepsán není, je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami, vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“. Obě tyto pole musí být vždy kolmé na základnu. Skutečná přímka, nejčastěji osa čepu nebo díry, musí ležet v tomto vymezeném poli.



obr. 3-21 Předpis a vymezení tolerančního pole pro kolmost přímky k základně tvořené plochou [6]

Plocha k základně tvořené přímkou

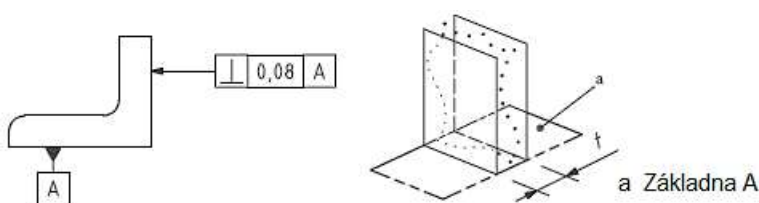
Pro tolerování plochy k základně tvořené přímkou je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“ (obr. 3-22) [6]. I toto toleranční pole musí být kolmé na základnu. Nejčastější využití tohoto předpisu je pro tolerování os čepů. Skutečná rovina musí ležet ve vymezeném poli.



obr. 3-22 Předpis a vymezení tolerančního pole pro kolmost plochy k základně tvořené přímkou [6]

Plocha k základně tvořené plochou

Pro tolerování plochy vztahované k ploše základny je toleranční pole taktéž vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdálené o velikost tolerance „t“ [6]. Opět i toto toleranční pole musí být kolmé na rovinu základny, jak je patrné z obr. 3-23.



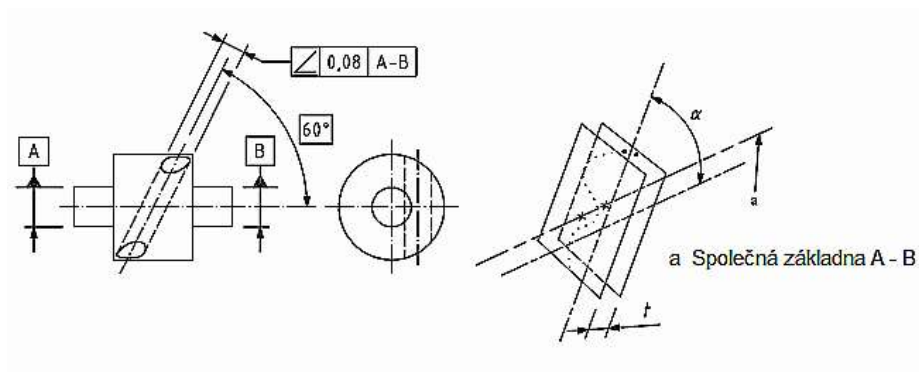
obr. 3-23 Předpis a vymezení tolerančního pole pro kolmost plochy k základně tvořené plochou [6]

3.4.3 Tolerance sklonu

I toleranci sklonu je možné rozdělit do čtyř podskupin, podle toho, jaký použijeme v předpisu prvek a jakou základnu.

Sklon přímky k základně tvořené přímkou

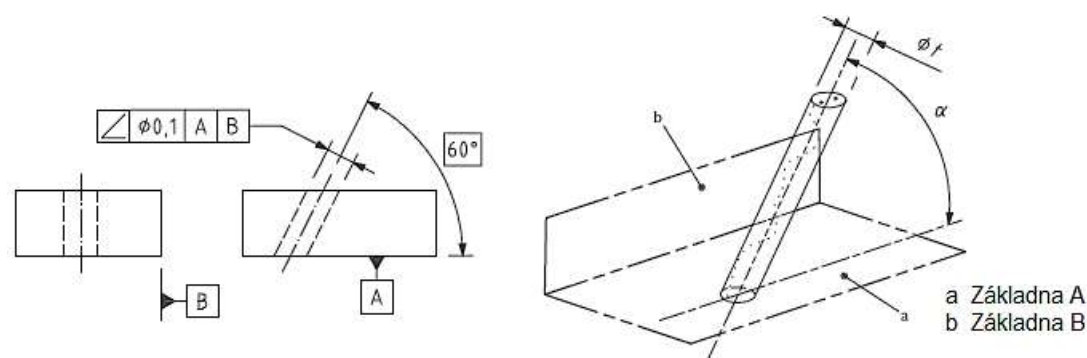
Pro tolerování sklonu přímky k základně tvořené přímkou je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“ (obr. 3-24) [6]. Toto pole je vůči základně skloněno v určitém úhlu, který je dán teoreticky přesnou hodnotou. Skutečná přímka (nejčastěji osa díry nebo čepu) se musí nacházet v tomto vymezeném tolerančním poli.



obr. 3-24 Předpis a vymezení tolerančního pole pro sklon přímky k základně tvořené přímkou [6]

Sklon přímky k základně tvořené plochou

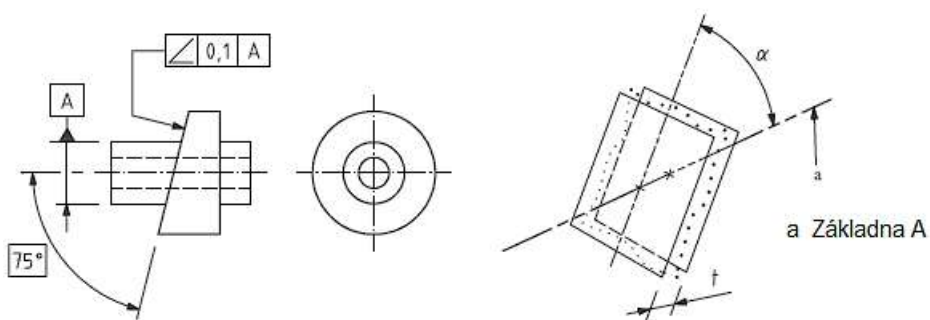
Pro tolerování sklonu přímky k základně tvořené plochou je toleranční pole vymezeno válcem. Toto platí pouze v případě, kdy se před číselnou hodnotou nachází symbol průměru „Ø“ [6]. Toleranční pole je skloněno pod teoreticky přesným úhlem a jeho průměr bude mít velikost tolerance „t“ (obr. 3-25). Skutečná přímka (nejčastěji osa čepu nebo díry) se musí nacházet v tomto poli. Pokud není předepsán symbol průměru, je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými o velikost tolerance „t“. I toto pole musí být skloněno pod teoreticky přesným úhlem.



obr. 3-25 Předpis a vymezení tolerančního pole pro sklon přímky k základně tvořené plochou [6]

Sklon plochy k základně tvořené přímkou

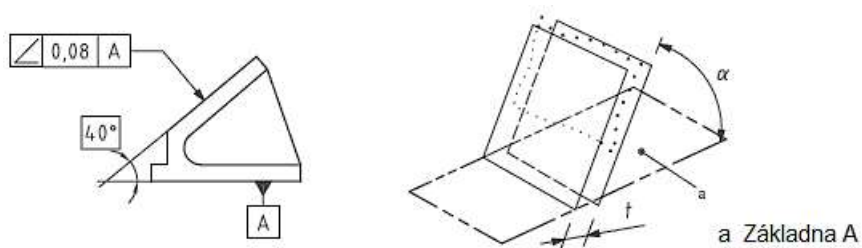
Pro tolerování sklonu plochy k základně tvořené přímkou je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami, vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“ [6]. Toto pole je vůči přímce základny skloněno pod teoreticky přesným úhlem (obr. 3-26). Skutečná plocha se musí nacházet v tomto vymezeném tolerančním poli.



obr. 3-26 Předpis a vymezení tolerančního pole pro sklon plochy k základně tvořené přímkou [6]

Sklon plochy k základně tvořené plochou

Pro tolerování sklonu plochy k základně tvořené plochou je toleranční pole taktéž vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu „ t “ [6]. Toto pole je také vůči rovině základny skloněno pod teoreticky přesným úhlem (obr. 3-27). Skutečná plocha se musí nacházet v tomto tolerančním poli.



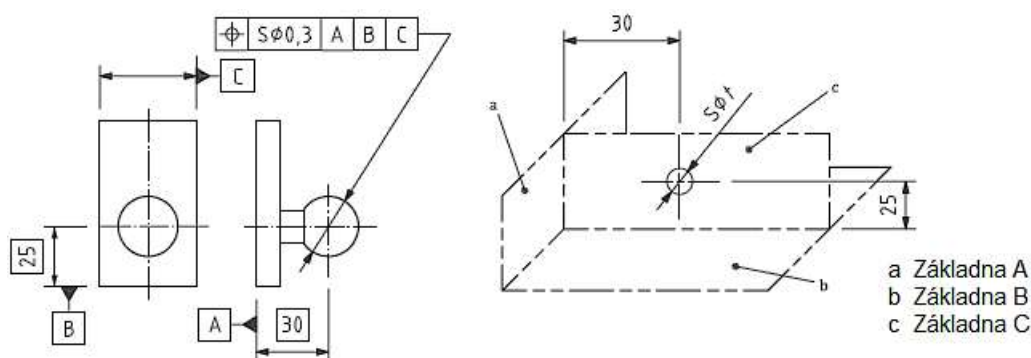
obr. 3-27 Předpis a vymezení tolerančního pole pro sklon plochy k základně tvořené plochou [6]

3.5 Tolerance umístění

3.5.1 Tolerance polohy

Tolerance polohy bodu

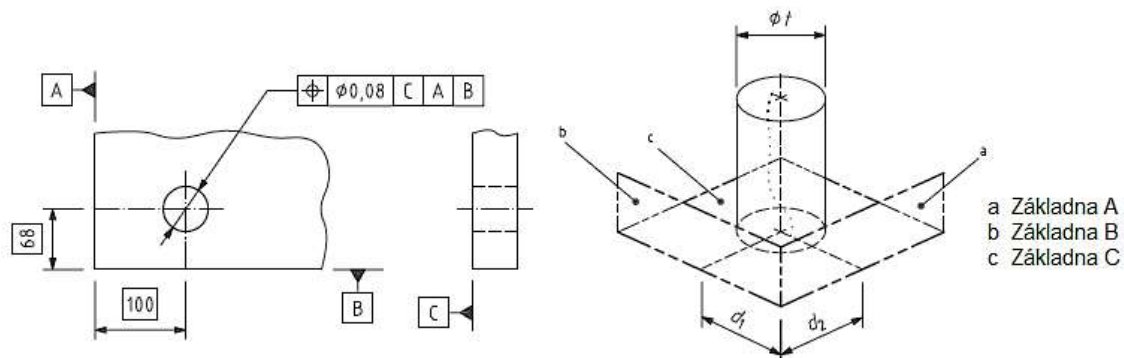
Pro tolerování polohy bodu je toleranční pole vymezeno pomocí koule s průměrem o velikosti tolerance „ t “ (obr. 3-28) [6]. Při předpisu kulového tolerančního pole musí být vždy před číselnou hodnotou velikosti symbol „ $S\varnothing$ “. Polohu středu zapisujeme pomocí teoreticky přesných hodnot, které nám udávají přesnou polohu tolerančního pole, v závislosti na umístění základen.



obr. 3-28 Předpis a vymezení tolerančního pole pomocí koule u tolerance polohy bodu [6]

Tolerance polohy přímky

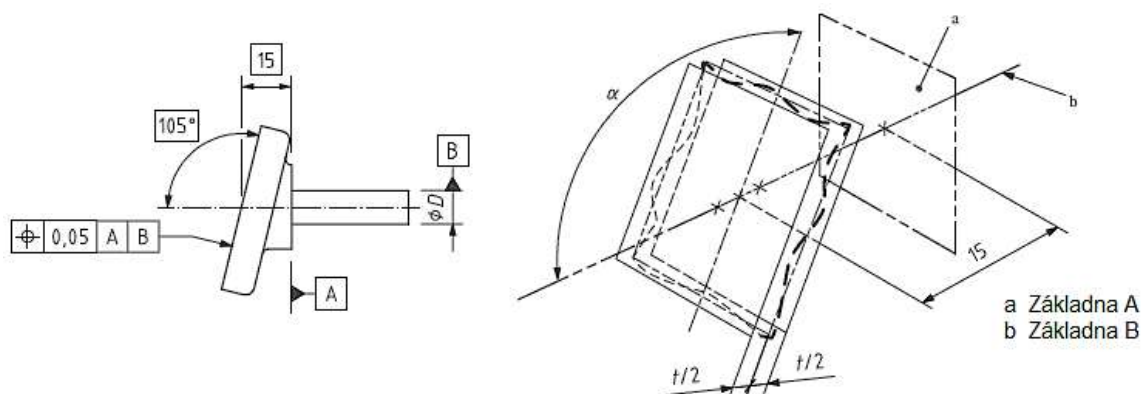
Pro tolerování polohy přímky je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými o velikost tolerance „ t “ [6]. Toto pole je rozloženo symetricky kolem teoreticky přesné polohy díry nebo čepu, vzhledem k umístění základen. V případě, že se nachází před velikostí tolerance symbol průměru „ $\varnothing$ “, je toleranční pole vymezeno válcem, jehož průměr má velikost tolerance „ t “ (obr. 3-29). Skutečná přímka musí ležet v tomto vymezeném tolerančním poli. Tato metoda tolerování se využívá např. k umístění přesných rysek na součást, určení přesné polohy díry nebo čepu atd.



obr. 3-29 Předpis a vymezení tolerančního pole u tolerance polohy přímky [6]

Tolerance polohy rovinné plochy nebo střední roviny

Pro tento způsob tolerování polohy je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami. Ty jsou od sebe vzdáleny o velikost tolerance „t“ (obr. 3-30) [6]. Toleranční pole je symetricky rozloženo kolem teoreticky přesné polohy a skutečná plocha musí ležet v tomto tolerančním poli.



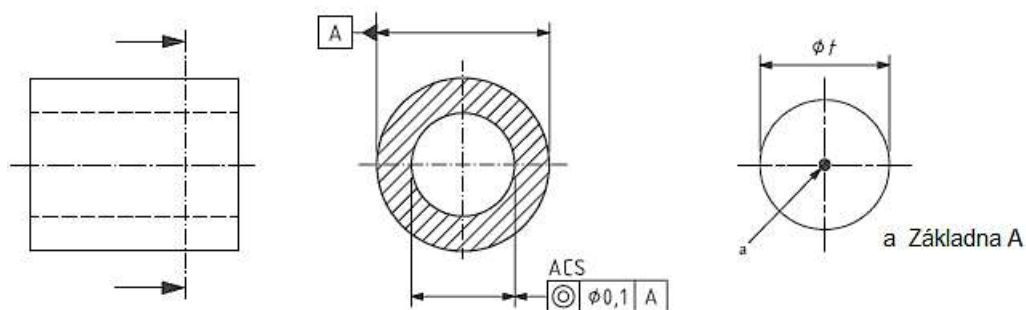
obr. 3-30 Předpis a vymezení tolerančního u tolerance polohy rovinné plochy nebo střední roviny [6]

3.5.2 Tolerance soustřednosti a souososti

Pod jedním symbolem se v tomto případě ukrývají dvě různé geometrické tolerance. V prvním případě jde o toleranci soustřednosti bodu a v druhém případě jde o toleranci souososti bodu.

Tolerance soustřednosti bodu

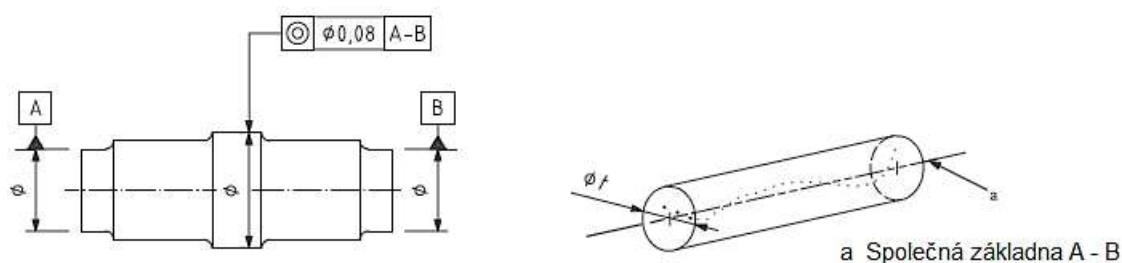
Pro tolerování soustřednosti bodu je toleranční pole vymezeno kruhem, který je soustředný s bodem základny [6]. Průměr kruhu odpovídá velikosti tolerance „t“ předepsané v tolerančním rámečku. Při předpisu je nutné uvést před číselnou hodnotu symbol průměru „Ø“ (obr. 3-31). Skutečný střed díry nebo čepu, musí ležet v tomto vymezeném poli.



obr. 3-31 Předpis a vymezení tolerančního pole u tolerance soustřednosti bodu [6]

Tolerance souososti bodu

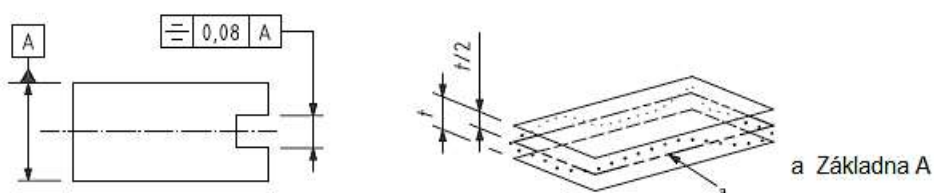
Pro tolerování souososti bodu je toleranční pole vymezeno válcem. Jeho průměr má velikost tolerance „t“ a osa je totožná se základnou. Při předpisu je nutné uvést před číselnou hodnotu symbol průměru „Ø“ (obr. 3-32) [6]. Dle potřeby je možné toleranci předepsat k více základnám nebo ke společné základně. Nejčastější využití je pro uložení hřídelů v ložiskách. Skutečná přímka (osa hřídele) musí ležet ve vymezeném poli.



obr. 3-32 Předpis a vymezení tolerančního pole u tolerance souososti bodu [6]

3.5.3 Tolerance souměrnosti

Pro toleranci souměrnosti je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou symetricky rozloženy kolem základny tvořené osou symetrie součásti. Tyto roviny jsou od sebe vzdáleny o velikost tolerance „t“ (obr. 3-33) [6]. V závislosti na potřebě je možné opět tolerovat k více základnám, nebo ke společné základně. Skutečná osa souměrnosti musí ležet ve vymezeném poli. Tato tolerance je velmi často využívána při tolerování drážky pro pero.



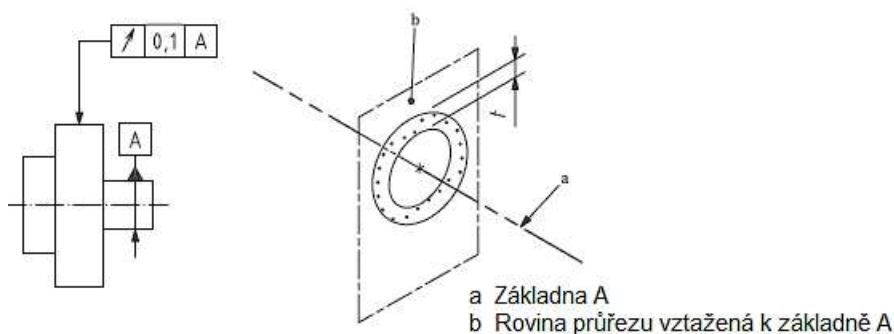
obr. 3-33 Předpis a vymezení tolerančního pole u tolerance souměrnosti [6]

3.6 Tolerance házení

3.6.1 Tolerance kruhového házení

Kruhové házení obvodové

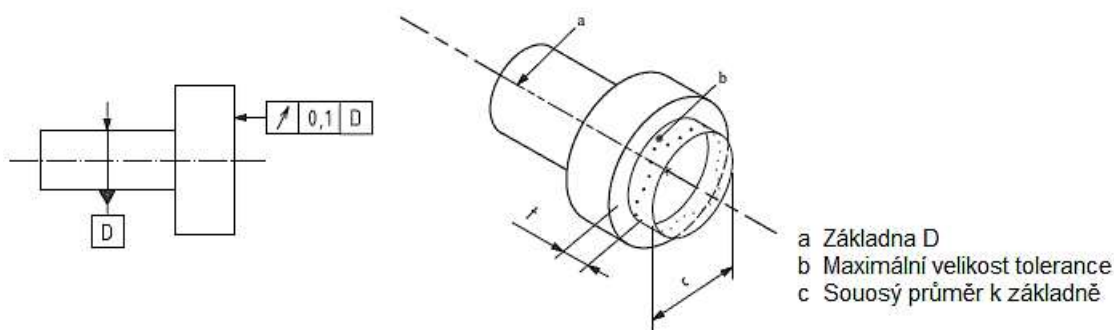
Pro tolerování obvodového kruhového házení je toleranční pole vymezeno dvěma soustřednými kružnicemi. Tyto kružnice jsou kolmé na základnu a jejich střed je s ní shodný. Velikost tolerančního pole „t“ je dána rozdílem poloměrů (obr. 3-34) [6]. Obvykle se obvodové házení vztahuje k celému prvku součásti. Skutečná přímka musí ležet v tomto vymezeném poli.



obr. 3-34 Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci kruhového obvodového házení [6]

Kruhové házení čelní

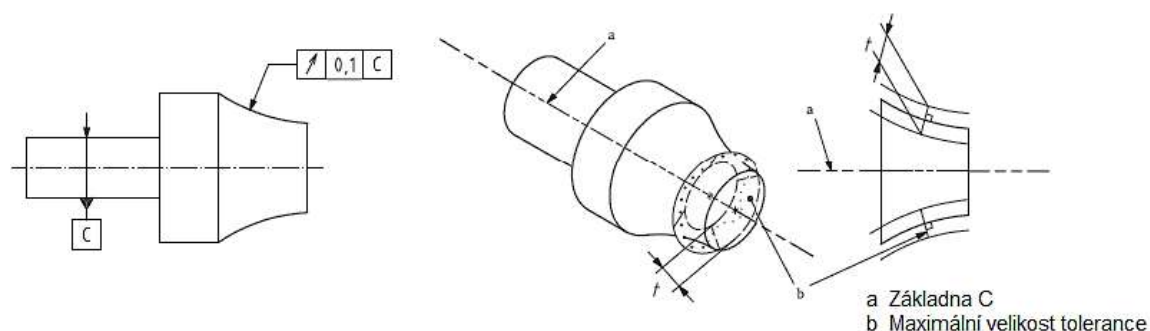
Pro tolerování čelního kruhového házení je toleranční pole vymezeno dvěma kružnicemi vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“. Společně tvoří válcový průřez, který má svou osu shodnou se základnou (obr. 3-35) [6]. V čelním házení se projevuje úchylka kolmosti čela k základně. Skutečná čára tvořená otáčením součásti musí ležet v tomto vymezeném poli.



obr. 3-35 Předpis a vymezení tolerančního pole pro kruhové čelní házení [6]

Kruhové házení v libovolném směru

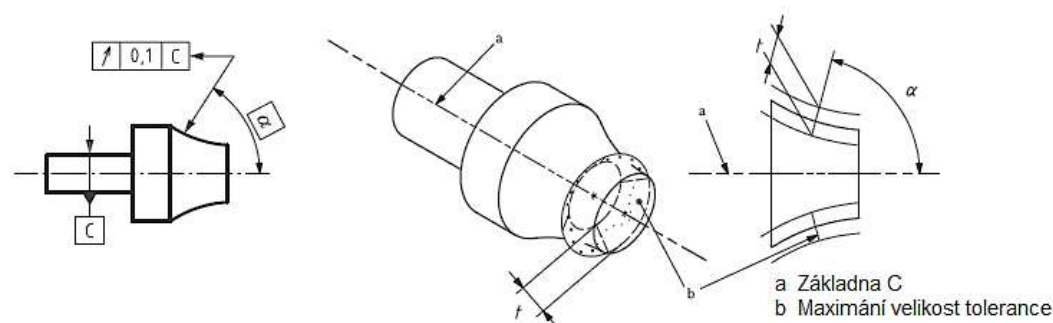
Pro tolerování kruhového házení v libovolném směru je toleranční pole vymezeno dvěma kružnicemi, které jsou od sebe vzdáleny o velikost tolerance „t“ (obr. 3-36) [6]. Jejich střed je shodný se základnou. Pokud není předpisem stanoveno jinak, toleranční pole má šířku ve směru normály k předepsané geometrii. V situaci, kdy tvořící čára tolerovaného prvku součásti nebude mít tvar přímky, vrcholový úhel se bude měnit v závislosti na reálné poloze.



obr. 3-36 Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci kruhového házení v libovolném směru [6]

Kruhové házení v daném směru

Pro tolerování kruhového házení v daném směru je toleranční pole vymezeno stejně jako v předchozím případě dvěma kružnicemi vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“. Na rozdíl od předchozí tolerance, je zde toleranční pole vymezeno v jakémkoliv průřezu pod teoreticky přesným úhlem (na obr. 3-37 úhel α) [6]. Skutečná čára vytvořená otáčením prvku, musí ležet v tomto vymezeném poli.

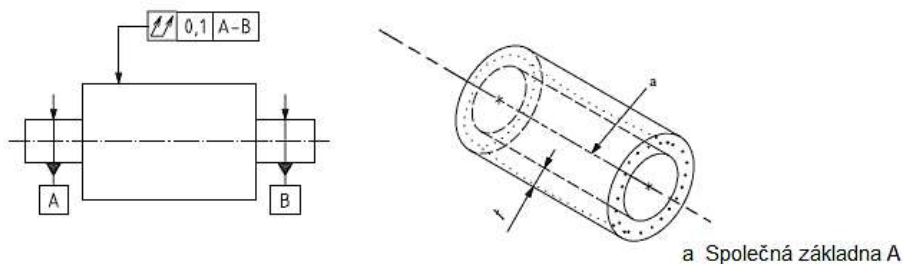


obr. 3-37 Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci kruhového házení v daném směru [6]

3.6.2 Tolerance celkového házení

Celkové obvodové házení

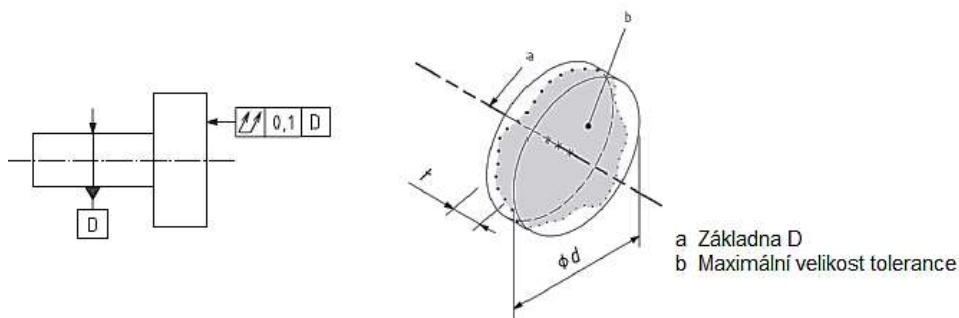
Pro tolerování celkového obvodového házení je toleranční pole vymezeno dvěma sousými válci s osou shodnou se základnou [6]. Velikost tolerančního pole je dána rozdílem poloměrů příslušných válců. Do celkového obvodového házení se promítají úchytky válcovitosti a sousosti. Tento typ tolerance se předepisuje pouze u válcových ploch. Na obr. 3-38 je možné vidět, toleranci vztaženou ke společné základně A-B.



obr. 3-38 Předpis a vymezení tolerančního pole pro celkové obvodové házení [6]

Celkové čelní házení

Pro tolerování celkového čelního házení je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o velikost tolerance „t“. Tyto roviny musí být kolmé na základnu (obr. 3-39) [6]. Do celkového čelního házení se promítají úchytky rovinnosti čelní plochy a její kolmost. Tento typ tolerance se předepisuje pouze u čel rotačních součástí.



obr. 3-39 Předpis a vymezení tolerančního pole pro celkové čelní házení [6]

3.7 Měření geometrických tolerancí

Kontrola vyrobených součástí je důležitým krokem výroby. Jejím cílem je předcházení vzniku chyb a zároveň i vyřazení špatně vyrobených kusů. Výběr měřicí metody závisí na čtyřech důležitých faktorech.

Prvním faktorem je finanční náročnost, kdy je třeba uvážit rozsah výroby. V návaznosti na něm je třeba rozhodnout, zdali bude dostačovat měření pomocí jednoduchých konvenčních metod nebo je nutné investovat do metod finančně náročnějších.

Druhým faktorem je požadovaná výstupní přesnost měření. Je-li požadována vysoká, je výhodné zvolit metodu kontroly pomocí nekonvenčních metod. Z tohoto důvodu, že jednoduché konvenční metody měří pouze na setiny milimetru.

Dalším faktorem je tvarová náročnost měřené součásti. Při kontrole tvarově složité součásti s více prvky vzájemně mezi sebou tolerovanými, je výhodné využití nekonvenčních metod. U jednoduchých, složitě nenáročných součástí postačí ke kontrole konvenční metody.

Posledním faktorem pro volbu měřicí metody je objem výroby a rychlost měření. Pro malý objem výroby (kusová nebo malosériová výroba) je vhodné využití konvenčních metod, jelikož pořízení speciálního přístroje je neekonomické. Pro hromadnou výrobu je nejvýhodnější využití nekonvenčních přístrojů z důvodu větší rychlosti a přesnosti kontroly.

3.7.1 Měření tolerancí užitím konvenčních metod

Pro kontrolu geometrických tolerancí pomocí konvenčních metod lze využít různého jednoduchého příslušenství. Mezi toto příslušenství lze zařadit:

- Průměrné desky – slouží jako základna pro měřicí a kontrolní úlohy. Mají velmi vysokou přesnost rovinnosti.
- Prizmatické podstavce – používají se pro kontrolu rotačních dílů. Vyrábí se z oceli nebo granitu v různých tvarových provedeních.
- Hrotové podstavce – jsou určeny pro kontrolu rotačních dílů, kdy jsou díly upnuty mezi hroty přístroje.

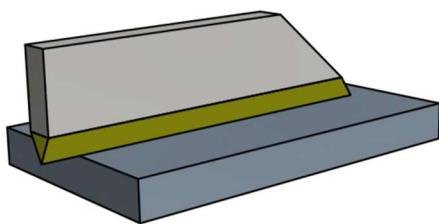
Pro kontrolu úchylek se používají různé druhy jednoduchých měřicích přístrojů.

- Koncové měrky – patří mezi nejdůležitější prvky pro měření. Měřicí plochy mají velmi vysokou přesnost. Jsou vyrobeny z nástrojové oceli, karbidu wolframu anebo speciální keramiky, která má 100% odolnost proti korozi [7].
- Sinusová pravítka – ve spojení s koncovými měrkami a úchylkoměrem, slouží pro kontrolu úhlů.
- Nožová pravítka – využívají se pro kontrolu průsvitem světla, především u kontroly tolerance přímosti a rovinnosti.

- Posuvné měřítko – využívá se pro kontrolu tolerance polohy. Pro přesnější výslednou hodnotu se využívá měřítko středové vzdálenosti, které je zakončeno hroty.
- Mikrometr – je přesnější než posuvné měřítko, jelikož měří až na tisícinu milimetru. Využívá se k orientačnímu měření tolerance kruhovitosti a válcovitosti.
- Úchylkoměr – nejčastější a nejuniverzálnější měřidlo pro dílenské použití. Při rotačním nebo posuvném pohybu měří s přesností na setiny milimetru.
- Úhelníky a úhloměry – patří mezi nejjednodušší metody kontroly kolmosti dvou rovin. Tyto měřidla se využívají pro kontrolu průsvitem [7].

Měření tolerance přímosti

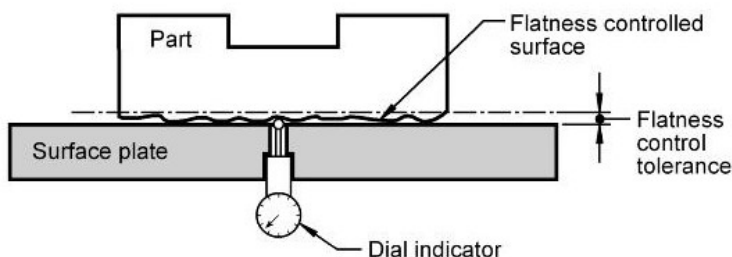
Kontrola tolerance přímosti rovinných ploch se provádí metodou zvanou průsvit, což patří mezi porovnávací metody (obr. 3-40). Přiložením nožového pravítka na povrch součásti a následným pohledem proti světlu se zjistí nepřesnosti. Touto metodou měření nelze zjistit velikost odchylky. Jde ji však zjistit pomocí měření úchylkoměrem, kdy se součást proměří po celé své délce [8]. Výslednou velikostí odchylky je absolutní rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou hodnotou. Pro kontrolu válcových ploch se využívá prizmatických podstavců, do kterých je kontrolovaná součást uložena.



obr. 3-40 Měření tolerance přímosti pomocí nožového pravítka

Měření tolerance rovinnosti

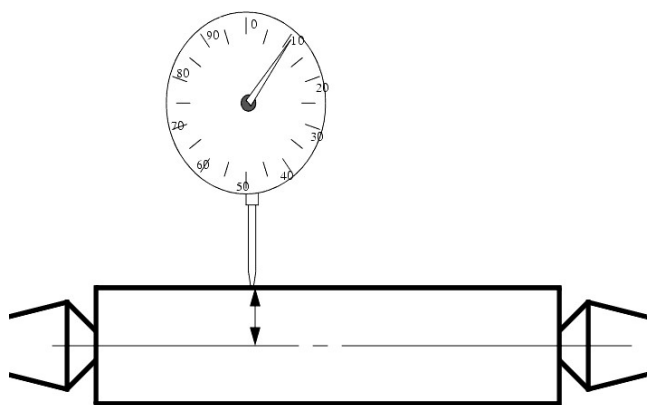
Kontrola tolerance rovinnosti ploch se realizuje obdobně jako u přímosti ploch. Rozdíl mezi měřeními je, že v tomto případě je nutné měřit plochu ve více směrech. Za největší odchylku od přesného tvaru je považována hodnota tvořená absolutním rozdílem mezi největší a nejmenší odchylkou naměřenou úchylkoměrem (obr. 3-41) [8].



obr. 3-41 Měření tolerance rovinnosti pomocí úchylkoměru [9]

Měření tolerance kruhovitosti

Kontrola tolerance kruhovitosti válcových ploch se realizuje pomocí úchylkoměru. Součást může být umístěna v prizmatických podstavcích, na rotačním stole nebo upevněna mezi hroty (obr. 3-42). Postupně se s ní otáčí a zjišťují se hodnoty úchylky. Měření se provádí na několika místech prvku. Rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou hodnotou se rovná výsledné úchylce.



obr. 3-42 Měření kruhovitosti pomocí úchylkoměru [10]

Měření tolerance válcovitosti

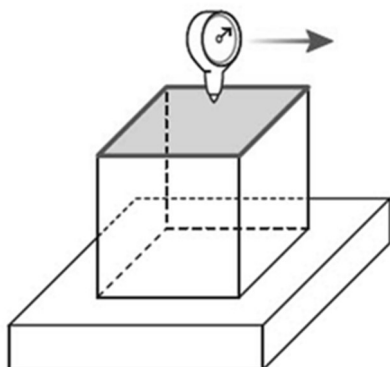
Tolerance válcovitosti zahrnuje úchylky kruhovitosti kolmých řezů a úchylky přímosti. Měřená součást je upnuta mezi hroty nebo je uložena do prizmatických podstavců. Prvotně je třeba změřit úchylku kruhovitosti pomocí úchylkoměru zafixovaném ve stojánku. Následně je změřena úchylka přímosti, pomocí pohybu úchylkoměru po celé délce [8]. Maximální naměřená hodnota je výsledná velikost úchylky.

Měření tolerance profilu čáry

Pro kontrolu tolerance profilu čáry nelze jednoznačně určit metodu měření. Jelikož se vyskytuje velké množství tvarů různých profilů, lze kombinovat měření pomocí šablon, úhloměrů, měrek apod. Nejvýhodnější je však měření pomocí nekonvenčních metod.

Měření tolerance rovnoběžnosti

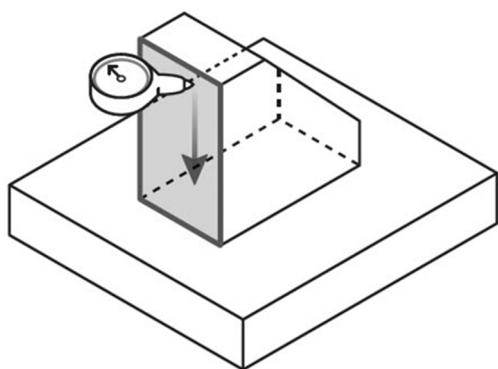
Pokud je prvkem základny plocha, provádí se tato kontrola na průměrné desce. Součást se položí základnou na průměrnou desku a úchylkoměrem se přejíždí po celé protilehlé ploše [11]. Tento způsob kontroly lze vidět na obr. 3-43. Výsledná hodnota odchylky je potom rovna rozdílu mezi největší a nejmenší naměřenou hodnotou.



obr. 3-43 Měření rovnoběžnosti pomocí úchylkoměru [11]

Měření tolerance kolmosti

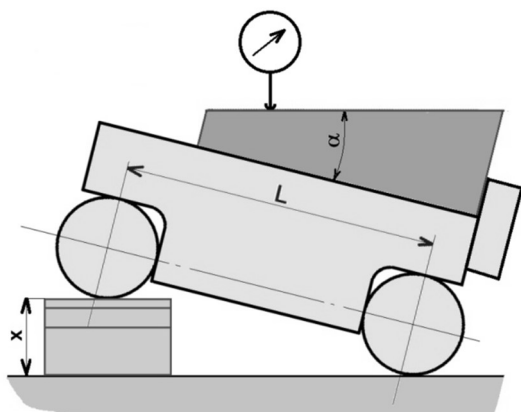
Pro kontrolu tolerance kolmosti lze opět využít kontroly průsvitem, tentokrát pomocí úhelníku, kdy nezjistíme velikost odchylky. Pro zjištění této velikosti lze využít podobnou metodu jako je měření rovnoběžnosti. Jediným rozdílem je otočení úchylkoměru o 90°, vzhledem k základně (obr. 3-44) [11]. Výsledná hodnota odchylky od ideálního tvaru je dána rozdílem mezi největší a nejmenší naměřenou hodnotou.



obr. 3-44 Měření kolmosti pomocí úchylkoměru [11]

Měření tolerance sklonu

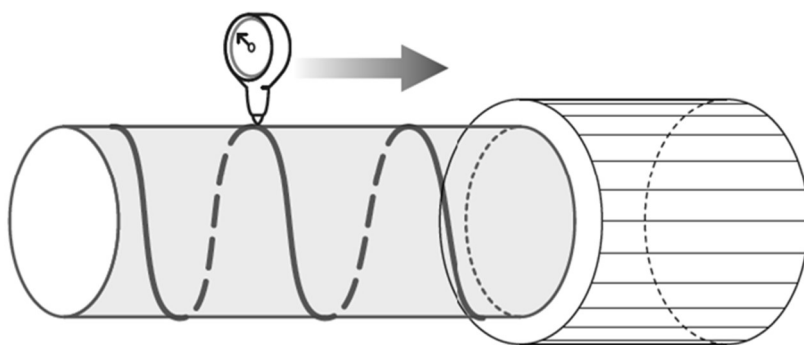
Kontrolu tolerance sklonu je možné realizovat dvěma různými způsoby. Prvním je kontrola průsvitem, kdy se úhloměr nastaví na určitý úhel, a pohledem proti světlu kontrolujeme průsvit mezerami odchylek. Druhým způsobem je měření pomocí sinusového pravítka a úchylkoměru (obr. 3-45). Sinusové pravítko je třeba vypodložit koncovými měrkami do takového stavu, aby kontrolovaná plocha byla rovnoběžná s měřicí deskou [7]. Úchylkoměrem upnutým ve stojánek se poté přejíždí po povrchu prvku. Výslednou velikost odchylky nám dá rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou hodnotou.



obr. 3-45 Měření sklonu pomocí sinusového pravítka [12]

Měření tolerance celkového obvodového házení

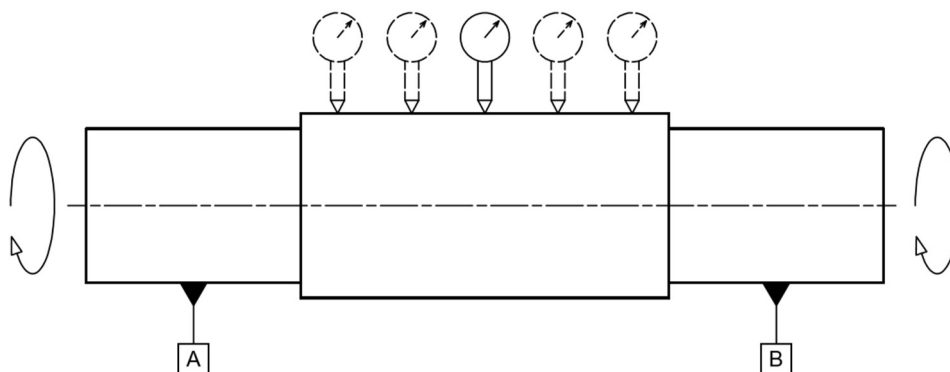
Kontrola tolerance celkového obvodového házení patří mezi nejjednodušší. Měřená součást se upne mezi hroty, nebo se umístí do prizmatických podstavců. Součástí se poté otáčí a úchylkoměrem naměříme nejmenší a největší hodnotu (obr. 3-46) [11]. Rozdíl mezi těmito hodnotami tvoří výslednou velikost odchylky.



obr. 3-46 Měření celkového obvodového házení [11]

Měření kruhového házení

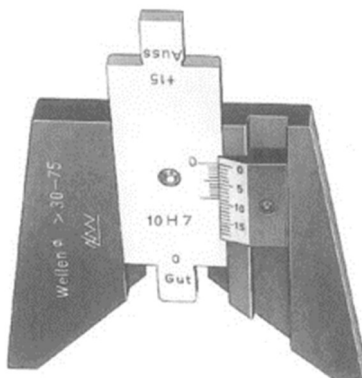
Pro kontrolu kruhového házení se využívá úchylkoměr. Součást je umístěna v prizmatických podstavcích nebo je upevněna mezi hroty a postupně se s ní otáčí (obr. 3-47) [11]. Měření je nutné provádět na několika místech prvku. Výslednou úchylku tvoří rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou hodnotou.



obr. 3-47 Měření kruhového obvodového házení

Měření tolerance souměrnosti

Kontrola tolerance souměrnosti patří mezi náročnější měření z důvodu měření k virtuální rovině [11]. V dílenském prostředí je možné měřit pouze pomocí odměření vzdálenosti od boků součásti. Drážky pro pero lze kontrolovat pomocí speciálního kalibru (obr. 3-48).



obr. 3-48 Kalibr pro měření drážek na hřídeli [13]

Měření tolerance polohy, soustřednosti a souososti

Pro kontrolu tolerance polohy se využívá posuvné měřítko nebo měřítko středové vzdálenosti. Pomocí něj se zjistí rozteče mezi otvory nebo čepy. Toto měření není zcela přesné, a proto je z tohoto důvodu výhodné užití měřicích strojů.

Měření tolerance soustřednosti a souososti

Kontrola tolerance soustřednosti a souososti je považována za jednu z nejnáročnějších. Pomocí konvenčních metod je prakticky neproveditelná [11].

3.7.2 Nekonenční metody měření

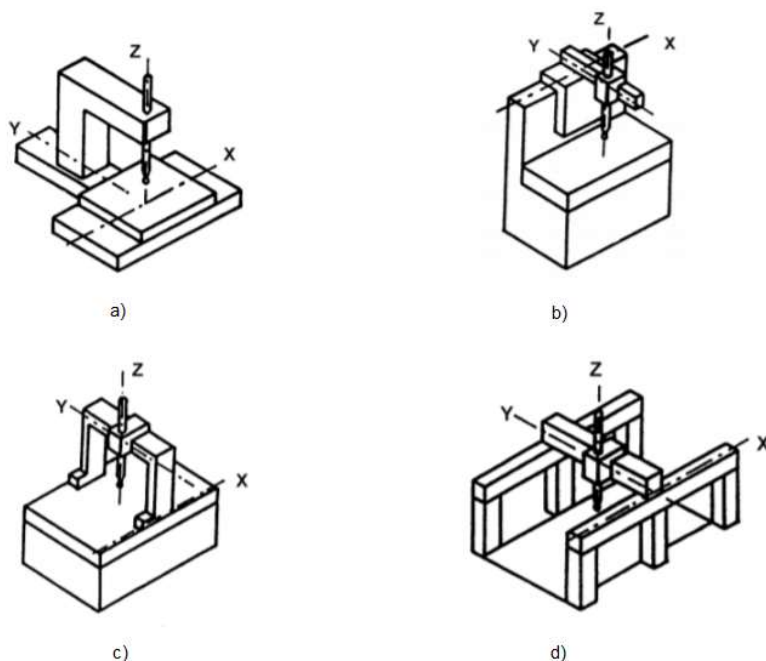
Kontrola předepsaných úchylek se pomocí nekonvenčních metod měření provádí na kontrolních strojích, které dokážou měřit více druhů geometrických tolerancí zároveň.

Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (SMS) patří mezi nejčastěji využívané stroje, pro kontrolu prakticky všech druhů geometrických tolerancí. Díky své vysoké přesnosti a rychlosti se hojně vyskytují v automobilovém a leteckém průmyslu [14]. Velkou výhodou je, že dokážou měřit na pěti stranách součásti.

Podle konstrukce se SMS dají rozdělit na čtyři skupiny.

- Stojanové SMS – měří s velmi vysokou přesností malé součásti (obr. 3-49a).
- Výložníkové SMS – díky své konstrukci je jimi umožněno měřit dlouhé součásti (obr. 3-49b).
- Portálové SMS – měří s vysokou přesností velké součásti, nevýhodou je velmi špatný přístup k součásti při měření (obr. 3-49c).
- Mostové SMS – jsou nejčastěji používaným typem souřadnicových měřicích přístrojů. Bohužel vzhledem ke své velikosti mají nižší přesnost měření (obr. 3-49d).



obr. 3-49 Rozdělení SMS podle konstrukce [15]

Měřicí mikroskopy

Ke kontrole malých strojních součástí se využívají měřicí mikroskopy (obr. 3-50), které mají velmi vysokou přesnost a rychlost měření [15]. Mohou měřit bezdotykově, pomocí okuláru s nitkovým křížem, nebo pomocí dotyku. Slouží pro kontrolu délkových rozměrů, úhlů, závitů, poloměrů a různých tvarových profilů. Velmi časté využití těchto přístrojů je v automobilovém a leteckém průmyslu.



obr. 3-50 Dílenský měřicí mikroskop AM 2 [16]

Profilprojektory

Profilprojektory jsou zařízení fungující na optickém principu [15]. Jsou to jednoduché stroje sloužící ke zvětšenému promítání snímaného obrazu na promítací plochu, díky čemuž dochází k výrazně kvalitnější kontrole konstrukčně složitých součástí (např. ozubená kola, vačky, tvarové frézy). Vyrábějí se v různých provedeních jako vertikální nebo horizontální. Vertikální profilprojektory jsou vyráběny jako stolní (obr. 3-51). U horizontálních profilprojektorů je možnost výběru mezi stolními a stojanovými zařízeními. Mají široké uplatnění, především však v automobilovém a elektronickém průmyslu.



obr. 3-51 Vertikální stolní profilprojektor [17]

Kruhoměr

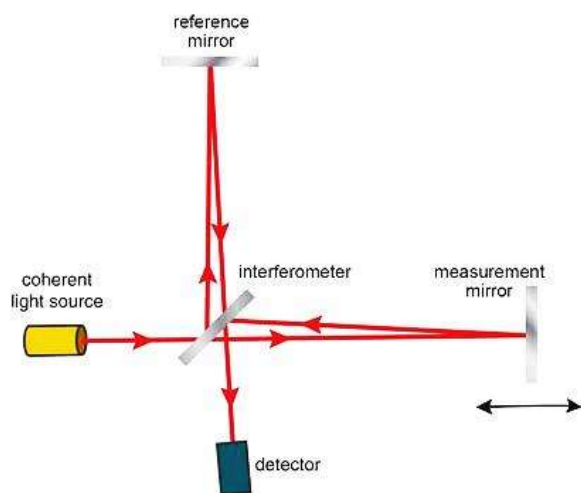
Kruhoměry lze využít ke kontrole tolerancí kruhovitosti, válcovitosti, házení, souososti a soustřednosti. Měření je velmi přesné a probíhá dotykem snímače na kontrolovaný prvek. Výstupem z měření je polární diagram se zaznačenými úchylkami [8]. Pro měření součástí jsou nejčastěji využívány kruhoměry s otočným stolem (obr. 3-52).



obr. 3-52 Dílenský kruhoměr RA-10 s otočným stolem [19]

Laserový interferometr

Laserové interferometry jsou velmi přesné přístroje, které lze využít ke kontrole tolerancí přímosti, rovinnosti a sklonu. Nejčastěji se pro měření využívá dvousvazkový Michelsonův interferometr (obr. 3-53). Při měření na velké vzdálenosti (až 50 metrů) vzniká vlivem rozdílné hustoty vzduchu lom paprsku, který následně vede k nepřesnostem v měření [20].



obr. 3-53 Základní princip funkce Michelsonova interferometru [21]

3.7.3 Chyby vznikající při měření

Každé měření je zatíženo chybou, která je nebo není ovlivnitelná člověkem. Mezi hlavní příčiny vzniku chyb patří nedokonalost a nespolehlivost měřicích přístrojů, teplotní chyba a nezkušenost osoby, která toto měření provádí a vyhodnocuje. Vždy je kladen důraz na to, aby se měření přiblížilo co nejblíže ke skutečné hodnotě. V praxi se dají nepřesnosti měření rozlišit na celkové a hrubé [7]. Hrubá chyba vzniká převážně nepozorností nebo přehlédnutím. Případně může vznikat poruchou měřicího přístroje, nebo nevhodně zvolenou metodou. Celkové chyby se skládají z chyb systematických a náhodných.

- Systematické (soustavné) chyby – vznikají důsledkem nepřesnosti měřicího přístroje nebo měřicí metody. Při opakovaném měření za stejně definovaných podmínek se hodnota nemění. Odstraňuje se pomocí korekce výsledné hodnoty (není-li uvedeno jinak, uvažuje se jedna polovina nejmenšího dílku měřidla), nebo změřením pomocí přesnějšího přístroje.
- Náhodné chyby – vznikají v důsledku náhodných příčin, kdy při každém měření jsou stejné podmínky, ale odchylky mají jinou velikost [7]. Tyto chyby nelze odstranit korekcí, lze je pouze zmírnit větším množstvím měření za stejných podmínek.

3.8 Rozměrové tolerance a textura povrchu

3.8.1 Rozměrové tolerance

Výkresem dané rozměry součásti jsou ve skutečnosti pouze teoretické hodnoty. Skutečné rozměry součásti se od nich odlišují díky nepřesnostem, které vznikají při výrobě. Aby byla součást správně vyrobena a následně zaručena její vyměnitelnost, je nutné, aby nepřesnosti byly v určitých mezích [22]. Tuto mez nám udává velikost tolerance. Pro zachování přijatelné ceny výroby se tolerování provádí pouze u funkčních ploch. V případě, že rozměr není konkrétně tolerován, platí pro něj všeobecné tolerance podle normy ČSN ISO 2768-1.

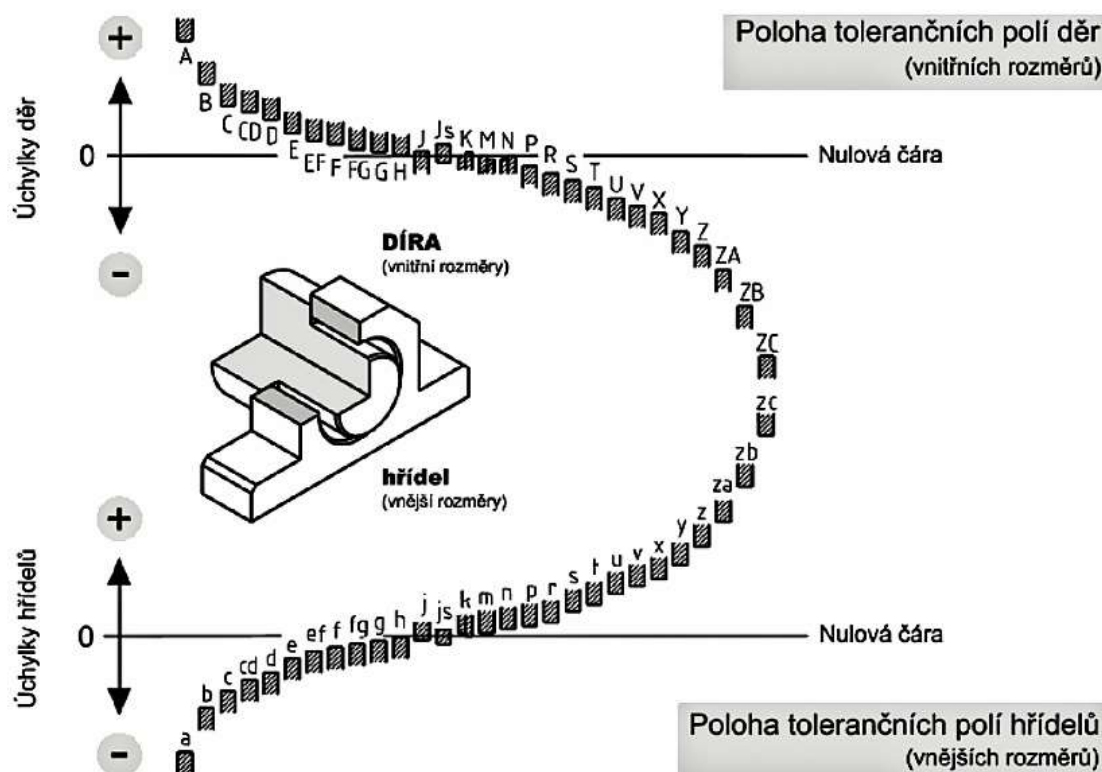
Tolerování pomocí mezních rozměrů

Rozměr předepsaný na výkrese považujeme za jmenovitý rozměr, ke kterému jsou přiřazeny mezní rozměry. Mezní rozměry určují maximální a minimální rozměr součásti, tudíž možnou nepřesnost výroby. Při správné výrobě součásti skutečný rozměr součásti leží mezi těmito hodnotami.

Systém tolerování ISO

Pro široké spektrum požadavků různých výrobních oborů bylo zavedeno normalizované tolerování. Soustava ISO má dvacet tolerančních stupňů, označovaných IT01, IT0, IT1, až IT18. Stupně přesnosti IT01 až IT4 jsou využívány pro výrobu kalibrů a měřidel. V běžné praxi se setkáváme se stupni přesnosti IT5 až IT11. Přesnosti IT15 až IT18 jsou využívány pro netolerované mezní úchytky délkových rozměrů a výrobu polotovarů.

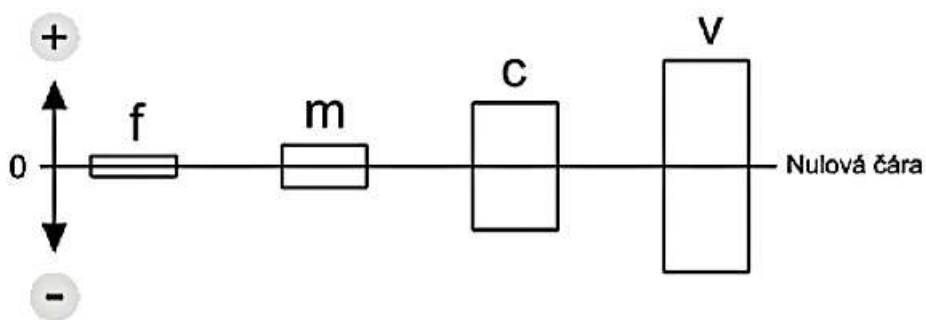
Toleranční třída se píše za jmenovitý rozměr a skládá se z označení tolerančního pole a stupně. Polohu tolerančního pole vůči jmenovitému rozměru určuje základní úchylka. Jeho velikost udává stupeň přesnosti IT a jmenovitý rozměr součásti [5]. Velikost písmene označující toleranční pole určuje, zdali se jedná o tolerování vnějších nebo vnitřních rozměrů. Jednotlivé rozložení tolerančních intervalů vzhledem k nulové čáře lze vidět na obr. 3-54.



obr. 3-54 Rozložení tolerančních intervalů vzhledem k nulové čáře [22]

Všeobecné rozměrové tolerance

Rozměry nefunkčních ploch, které nejsou konkrétně tolerovány, musí zůstat také v určitých mezích. Tyto meze vytyčuje norma ČSN ISO 2768-1, která je dělí do čtyř tříd přesnosti (obr. 3-55). Velikost tolerančního intervalu je závislá na jmenovitém rozměru a třídě přesnosti [5]. Tento interval je pak rozložen symetricky vzhledem k jmenovitému rozměru.



obr. 3-55 Čtyři třídy přesnosti dle normy ČSN ISO 2768-1 [22]

3.8.2 Drsnost povrchu

Při výrobě součástí je třeba dbát i na texturu povrchů, která vzniká každou technologickou metodou výroby. Řezné nástroje nebo brusiva nám zanechávají nerovnosti na obrobeném povrchu. Na neobrobeném povrchu texturu tvoří nerovnosti způsobené např. kováním, odléváním nebo otisky válců. Nedokonalosti povrchu (rýhy, sraženiny, koroze, trhliny apod.), které mohou být náhodně způsobeny např. během výroby nebo skladováním, se do hodnocení textur povrchu nezahrnují. Struktura povrchu je charakterizována jako opakované nebo náhodné úchyly od geometrických tvarů, které tvoří trojrozměrnou topografii povrchu [5]. V závislosti na velikosti rozteče nerovností, lze texturu povrchu rozdělit na tři složky. Drsnost povrchu je složka s nejmenší roztečí. Další složkou je vlnitost povrchu a třetí složka textury povrchu se nazývá základní profil, což je složka s největší roztečí nerovností.

Pro hodnocení textury povrchu se využívá nejčastěji profilová metoda. Pomocí přístrojů získáváme ze zkoumaného povrchu jeho profil, který je zdrojem informací pro posuzování textury povrchu. Ten vzniká jako průsečnice nerovností skutečného povrchu s rovinou vedenou kolmo na tento povrch [5]. Z profilu povrchu se opět pomocí přístrojů odvodí profil drsnosti, profil vlnitosti a profil základního profilu.

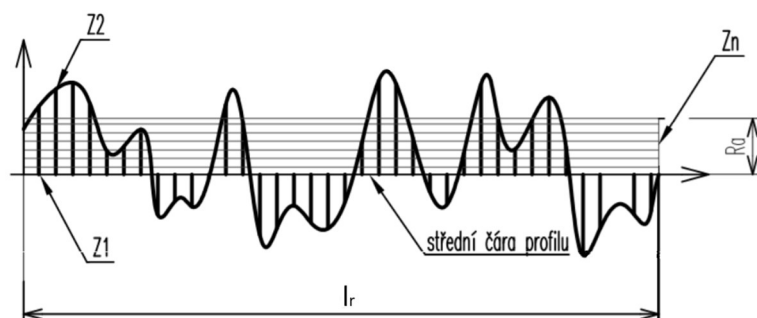
Parametr drsnosti profilu R_a

vyhodnocení profilu drsnosti existuje velké množství R parametrů. Nejznámější a v praxi nejběžnější je parametr drsnosti R_a – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu. Jedná se o parametr ve směru výšky.

Početně lze vyjádřit tento parametr pomocí rovnice:

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

Kdy R_a je aritmetický průměr absolutních hodnot všech pořadnic $Z(x)$ (výšek posuzovaného profilu v libovolné délce x) v rozsahu délky l_r . Parametr R_a může být znázorněn i graficky viz obr. 3-56 [5]. Bohužel příliš nevypovídá o skutečném profilu povrchu, jelikož se jedná o aritmetický průměr absolutních hodnot.

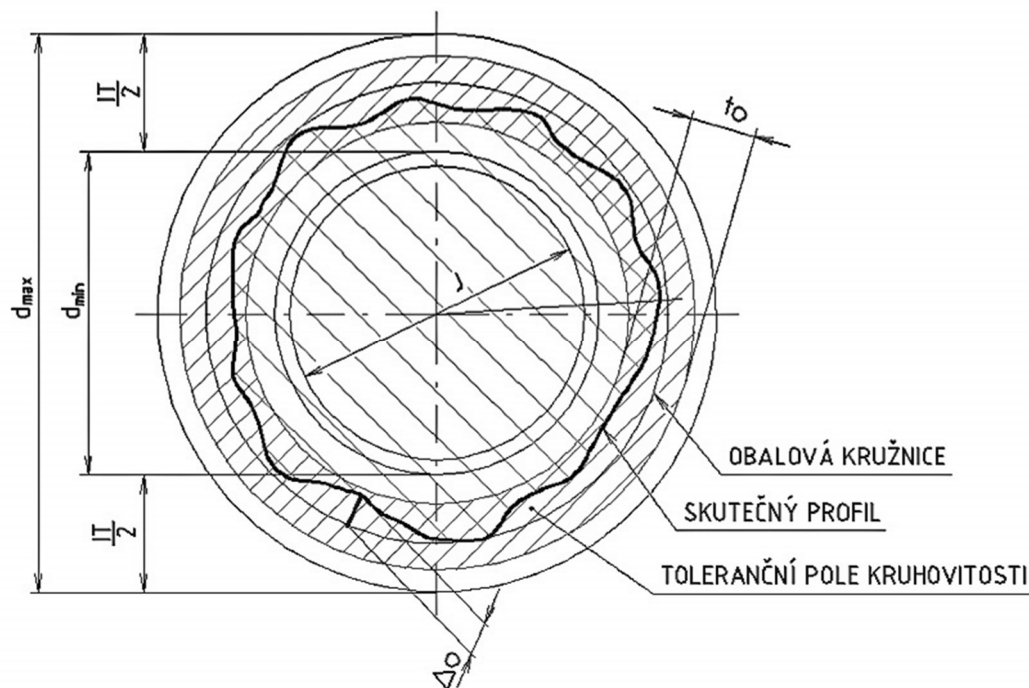


obr. 3-56 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [22]

Vyhodnocení drsnosti povrchu

- Pravidlo 16 % – pokud není předepsáno jinak, při vyhodnocování se řídíme pravidlem 16 %. Toto pravidlo je splněno tehdy, pokud maximálně 16 % všech naměřených hodnot parametru profilu na vyhodnocované délce, přesáhne hodnotu horní meze [5].
- Pravidlo maxima – je splněno, pokud ani jedna z naměřených hodnot na vyhodnocované délce profilu nepřesáhne předepsanou horní mez. Toto pravidlo je vepsáno do značky.

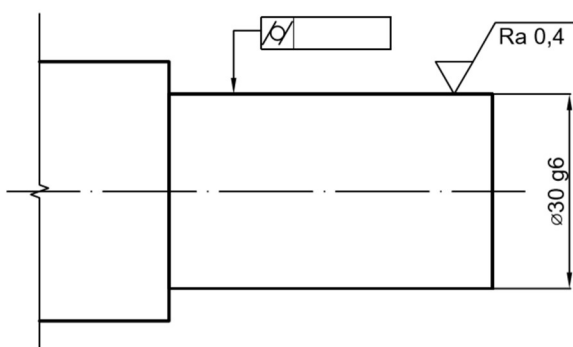
Mezi rozměrovými tolerancemi, geometrickými tolerancemi a drsností povrchu existuje určitá závislost. Toleranci tvaru nebo rovnoběžnosti ploch s tolerovanou vzdáleností a tolerancí rozměru lze číselně odvodit z tolerančního stupně za pomoci tzv. relativní geometrické přesnosti, která má tři stupně. Normální přesnost A, využívající přibližně 60 % tolerance rozměru, zvýšenou přesnost B, která využívá 40 % a vysokou přesnost C, mající přibližně 25 % [5]. V případě tolerování válcových ploch se využívá relativní přesnosti 30 %, 20 % a 12 %, jelikož je tolerance spojena s poloměrem (obr. 3-57).



obr. 3-57 Vztah tolerancí kruhovitosti a tolerancí rozměru [5]

Určení geometrické tolerance pomocí relativní geometrické přesnosti

Jako příklad si zvolíme válcový konec hřídele (obr. 3-58), který se otáčí v kluzném ložisku. Pomocí jmenovitého rozměru a stupně přesnosti si dle normy ČSN EN ISO 286-1 určíme velikost tolerančního pole. Dostaneme velikost 16 μm . Předepsaná drsnost pod kluzné ložisko je $Ra\ 0,4\ \mu\text{m}$, což tvoří zanedbatelných 2,1% velikosti tolerance. Normální přesnost A, vycházející z normy ČSN 01 4405, je 5 μm a využívá 31 % velikosti tolerance. Zvýšená přesnost B má velikost 3 μm a tím pádem využívá 18,75 % velikosti tolerance. Vysoká přesnost C se uvádí geometrická tolerance 2,5 μm a využívá 12,5 %. Normální přesnost se stává nevyhovující, jelikož přesahuje 30 % hodnoty tolerančního pole. U tohoto případu zvolíme zvýšenou přesnost B, protože již nepřesahuje 20 % zmíněné hodnoty tolerančního pole.



obr. 3-58 Válcový konec hřídele pro kluzné ložisko

3.9 Závislé tolerance

K vyjádření vztahu mezi délkovými a geometrickými tolerancemi se využívá tzv. principu nezávislosti. Z uvedeného principu vyplývá, že pokud jsou na výkrese předepsány rozměrové i geometrické tolerance, tak se každá tato tolerance posuzuje nezávisle [23]. Výsledný prvek součásti se poté může vyskytovat ve třech stavech.

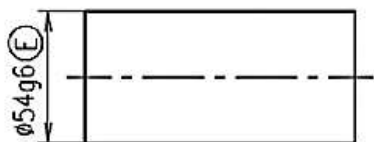
Pro zajištění zaměnitelnosti součástí, lze předpisem závislé tolerance docílit vzájemné zavislosti mezi délkovými a geometrickými tolerancemi [5]. Závislé tolerance se předepisují na výkresech pomocí tzv. modifikátorů, které lze vidět na obr. 3-59.

Popis	Modifikátor
Požadavek obalové plochy	Ⓔ
Požadavek maxima materiálu	Ⓜ
Požadavek minima materiálu	Ⓛ
Požadavek reciprocity	Ⓡ

obr. 3-59 Modifikátory závislých tolerancí

3.9.1 Požadavek obalové plochy

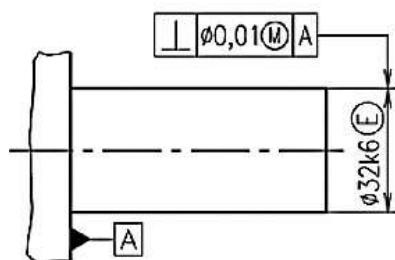
Požadavek předpisu obalové plochy nalézáme zejména u děr a hřídelí, které spolu následně tvoří uložení. Tento požadavek se předpisuje pomocí modifikátoru E, umístěného za velikostí rozměru na kótě daného prvku (obr. 3-60). V případě předpisu u hřídele tento požadavek znamená kontrolu horního mezního rozměru d_{max} pomocí obalové plochy. Při předpisu požadavku u díry se provede kontrola dolního mezního rozměru D_{min} pomocí obalové plochy [5]. Rozměry d_{min} a D_{max} jsou z pohledu smontovatelnosti nezajímavé, proto je stačí kontrolovat pouze dvoubodovým měřením, zároveň však nesmí tyto rozměry překročit dovolenou hodnotu. Díky tomuto požadavku je zaručena tvarová přesnost. Pokud je potřeba vyšší přesnost, je nutné předepsat toleranci tvaru.



obr. 3-60 Předpis požadavku obalové plochy [22]

3.9.2 Požadavek maxima materiálu

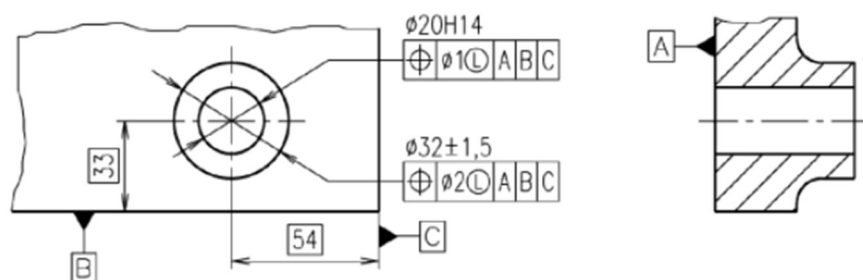
Díky předpisu tohoto požadavku je možné zvětšení předepsané geometrické tolerance v závislosti na skutečném rozměru prvku, při zachování zaměnitelnosti součástí. Tento požadavek je možné předepsat na výkres pomocí modifikátoru M, který je umístěn do tolerančního rámečku za hodnotu tolerance (obr. 3-61), nebo za označením základny. V případě, kdy je prvek vyroben na velikost minima materiálu, je možné přičíst ke geometrické toleranci rozměrovou a zvětšit tím toleranční pole [5]. Pokud je prvek vyroben na velikost maxima materiálu, je nutné se řídit pouze předepsanou geometrickou tolerancí. Využívá se pro hřídele a díry, které mají po smontování tvořit uložení s vůlí. Většinou se také využívá při toleranci polohy nebo kolmosti. Z funkčních důvodů není tento předpis vhodný pro uložení hřídelů spoluzabírajících kol nebo pro čepy přesných mechanismů.



obr. 3-61 Předpis požadavku maxima materiálu [22]

3.9.3 Požadavek minima materiálu

Požadavek minima materiálu funguje podobně jako požadavek maxima materiálu. I zde je možné zvětšení geometrické tolerance v závislosti na skutečném rozměru prvku, při zachování zaměnitelnosti součástí. Rozdílem je, že k prvku vyrobenému na maximum materiálu je možné přičíst ke geometrické toleranci rozměrovou a tím opět zvětšit toleranční pole [5]. V opačném případě je důležité se řídit pouze geometrickou tolerancí. Tento požadavek se předepisuje pomocí modifikátoru L, zapsaného za hodnotu geometrické tolerance (obr. 3-62), nebo za označením základny. Často se využívá pro zachování nejmenší tloušťky stěny mezi nálitkem a dírou.

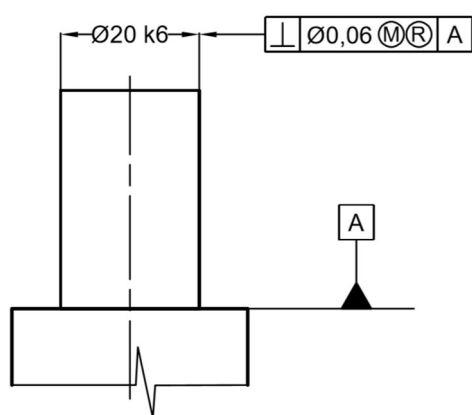


obr. 3-62 Předpis požadavku minima materiálu [22]

3.9.4 Požadavek reciprocity

Požadavek reciprocity se používá spolu s požadavkem maxima nebo minima materiálu. Využívá se tehdy, kdy je s ohledem na funkci součásti dovoleno zvětšení tolerance rozměru [5]. To nastává v momentě, kdy je např. osa čepu dokonale kolmá. Z geometrické tolerance tudíž nic nevyčerpá a následně o tuto hodnotu může být zvětšena rozměrová tolerance.

Pro příklad na obr. 3-63 je válcový konec hřídele s předpisem reciprocity a maxima materiálu. V případě dokonale kolmé osy tohoto prvku k základně, může horní mezní rozměr překročit svou velikost. K hornímu meznímu rozměru o velikosti 20,015 mm je možné připočítat celou velikost geometrické tolerance 0,06 mm. Pokud jsou splněny podmínky dokonale kolmé osy, může tento válcový konec hřídele nabývat hodnoty až Ø 20,075 mm.



obr. 3-63 Předpis požadavku reciprocity

3.10 Všeobecné geometrické tolerance

Všeobecné tolerance slouží ke zjednodušení a zpřehlednění výkresové dokumentace, díky nim dochází k usnadnění komunikace mezi výrobou a konstruktérem. Geometrické tolerance nefunkčních ploch, které nejsou konkrétně tolerovány, musí také zůstat v určitých mezích. Tyto meze vytyčuje norma ČSN ISO 2768-2, která se využívá především u prvků vyráběných třískovým obráběním.

Z ekonomických důvodů jsou nepředepsané geometrické tolerance rozděleny do třech tříd přesnosti. Pro výběr třídy je nutné vzít v úvahu technické vybavení dílny, kde se bude součást vyrábět. Třídy se značí pomocí velkých písmen, kdy H je nejpřesnější třída, K je střední přesností třída, L je hrubá třída [23]. Tento druh tolerování je platný pouze pro geometrické tolerance přímosti, rovinnosti, kruhovitosti, rovnoběžnosti, kolmosti, souměrnosti a kruhového házení. Pro tolerování podle této normy je nutné, aby v popisovém poli nebo jeho blízkosti byla tato skutečnost předepsána.

Kontrola prvků tolerovaných všeobecnou geometrickou tolerancí nemusí být nijak důkladná, dokonce i v případě mírného překročení hodnoty tolerance se nejedná o chybnou součást, která by musela být vyřazena.

4 DISKUZE

4.1 Obecná metoda pro volbu geometrických tolerancí

Pro návrh obecné metody volby geometrických tolerancí je nutné vycházet z předpokladu, že tolerovaná součást je už v předchozích krocích vhodně konstrukčně a pevnostně navržena. Také jsou zvoleny nakupované komponenty, které budou následně se součásti tvořit uložení. V případě dodržení těchto předpokladů má mnou navržený postup volby geometrických tolerancí čtyři kroky.

Prvním krokem postupu, je rozdělení součásti na jednotlivé prvky. Jelikož tolerujeme součást v závislosti na její funkci, je nutné definování funkčních a nefunkčních prvků. Nejčastějšími funkčními prvky jsou rovinné dosedací plochy, válcové plochy pro uložení např. ložisek, drážky pro pera nebo ozubení kol.

Druhým krokem je volba rozměrových tolerancí pro všechny funkční plochy. Vhodnou rozměrovou toleranci u rotačních součástí volíme podle potřeby uložení (např. uložení s přesahem pod valivá ložiska). Délkové rozměry je také možno tolerovat pomocí rozměrových obvodů, díky kterým je také možné zaručit následnou smontovatelnost součástí. Zároveň do tohoto kroku patří i volba vhodných drsností povrchu. Pro její určení v místech uložení nakupovaných komponentů, je vhodné se řídit doporučeními jednotlivých výrobců. U ostatních drsností je možné vycházet z normy ČSN 01 4451 [25], nebo ze znalostí konstruktéra.

Třetím krokem je volba vhodných geometrických tolerancí a jejich velikostí pro každý funkční prvek. Pro tolerance vztažené k základně je zároveň nutné vhodně zvolit místo umístění základny. Ta však nemusí ležet přímo na tolerovaném prvku. V případě předpisu tolerance vztažené ke dvěma nebo třem základnám je nutné brát v potaz pořadí jejich zápisu [4]. Velikost geometrických tolerancí vychází z normy ČSN 01 4405 [25]. Zároveň je nutné při předpisu velikosti brát ohled na technické vybavení dílny.

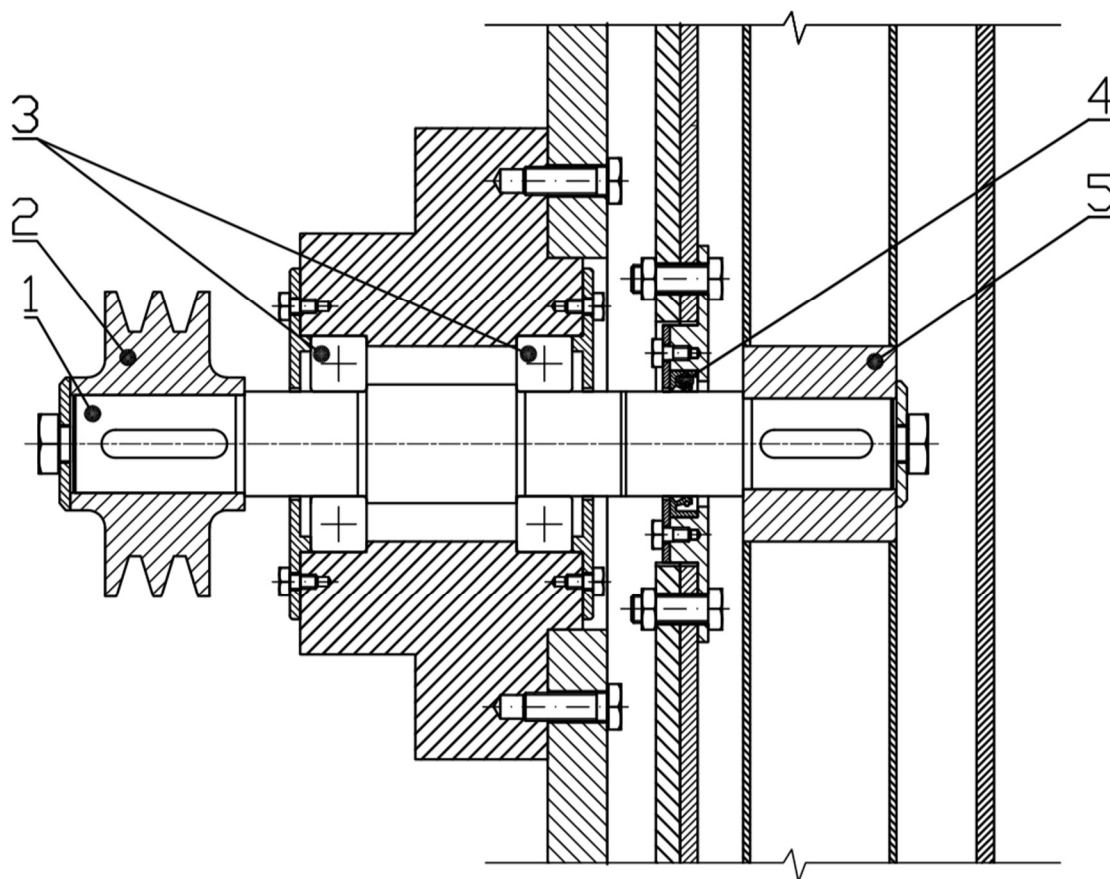
Čtvrtým krokem, je kontrola námi předepsaných tolerancí. V tomto kroku je nutné se podívat na součást opět jako na celek a zkontrolovat souvislost mezi jednotlivými tolerancemi. Zde je také vhodné zvážit ekonomickou náročnost výroby a uvážit případné snížení přesnosti výroby. Zároveň je třeba stále dbát na funkci součásti a její možnou zaměnitelnost.

4.2 Aplikace geometrických tolerancí na konkrétní součást

4.2.1 Specifikace vybrané součásti

Pro aplikaci měření a vyhodnocování geometrických tolerancí byla vybrána jako součást hřídel radiálního ventilátoru, který slouží k odvodu spalín z pece a jejich následné rekuperaci. Tento ventilátor je součástí tiskařského stroje Rotoman C 4/4 Cylinder. Kontrolovaná hřídel (pozice 1 na obr. 4-1), přenáší kroutící moment z elektromotoru Siemens na oběžné kolo ventilátoru.

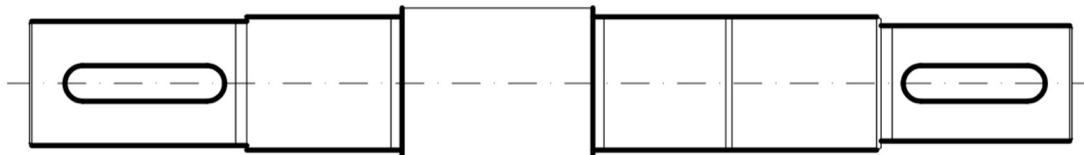
Hřídel byla vyrobena z oceli C16R. Následně byla cementována do hloubky $0,7^{+0,4}$ mm, popuštěna a kalena na tvrdost $58^{+0,4}$ HRC. Na hřídeli je uložena řemenice (pozice 2 na obr. 4-1), díky které je přenášen kroutící moment elektromotoru. Řemenice nacházející se na výstupu z elektromotoru, je spolu s řemenicí na hřídeli ventilátoru spojena pomocí dvou klínových řemenů. Dalšími komponentami jsou dvě ložiska 6206-2ZR (pozice 3 na obr. 4-1), hřídelový těsnící kroužek (pozice 4 na obr. 4-1) a oběžné kolo radiálního ventilátoru (pozice 5 na obr. 4-1).



obr. 4-1 Řez uložením hřídele radiálního ventilátoru

4.2.2 Volba vhodných geometrických tolerancí

Prvním krokem je rozdělení mnou zvolené hřídele na jednotlivé prvky. Jelikož má být součást tolerována z hlediska její funkce v celé sestavě, jsou jako funkční prvky zvoleny: drážky pro pera těsná, opěrné plochy ložiska a jednotlivé válcové dosedací plochy pro uložení řemenice, oběžného kola ventilátoru, hřídelového těsnicího kroužku a obou ložisek (všechny tyto plochy jsou vyznačeny na obr. 4-2 tučně). Ostatní plochy nepatří mezi funkční prvky.



obr. 4-2 Vyznačení funkčních prvků na hřídeli ventilátoru

V následující části budou pro každý konkrétní prvek společně rozebrány kroky dva a tři.

Válcové dosedací plochy pro uložení ložisek

Jelikož uložení ložisek ovlivňuje jejich spolehlivost a trvanlivost, je nutné dbát na správnou přesnost dosedacích ploch. Z důvodu, že jsou nakupovanou komponentou, je vhodné se pro návrh uložení řídit doporučením výrobce. Pro ložiska vyrobená s normální přesností, by měla odpovídat přesnost válcové úložné plochy alespoň tolerančnímu stupni IT6 [25]. Proto pro obě válcové dosedací plochy byla zvolena tolerance k6, která tvoří v kombinaci s ložiskem uložení s přesahem. Dle výrobcem doporučené hodnoty je drsnost obou dosedacích ploch zvolena Ra 0,8 μm .

Jelikož jsou tyto plochy dále využity jako základny pro geometrické tolerance, je důležité zaručit přesnou geometrii. Z tohoto důvodu je zde předepsána tolerance válcovitosti. Velikost tolerančního pole je zvolena v závislosti na průměru a stupni přesnosti dle normy. S ohledem na rozměrové tolerance a možnosti následné kontroly je pro tento případ dostačující normální geometrická přesnost s velikostí tolerančního pole 4 μm .

Opěrné plochy pro ložiska

Osazení, o které jsou opřena ložiska, nepatří mezi funkční rozměry, a proto není důvod jej konkrétněji tolerovat. Vystačí pouze všeobecné tolerance, které jsou na výkrese předepsány. Pro tuto plochu je zvolena drsnost Ra 1,6 μm , dle doporučení výrobcem ložisek [26].

Pro správnou funkci ložiska musí být tato válcová plocha tolerována čelním kruhovým házením. Jako základna pro geometrickou toleranci je vhodná společná osa mezi válcovými dosedacími plochami ložisek. Velikost tolerance dostaneme na základě rozměru průměru a stupně přesnosti přilehlého prvku. Z normy vyplývá toleranční pole o velikosti 8 μm . S ohledem na následnou kontrolu páčkovým úchylkoměrem, byla tato úchylka zvolena na velikost 20 μm .

Válcová dosedací plocha pro uložení hřídelového těsnícího kroužku

Přechod mezi plochou pro uložení ložiska a hřídelového těsnícího kroužku, je provedena pomocí normalizovaného zápichu tvaru D. Hřídelový těsnící kroužek je těsnící prvek, který zabraňuje vniku nečistot do prostoru, kde jsou umístěna ložiska. Jelikož těsnící kroužek je nakupovanou komponentou, je zde opět na místě dodržení doporučení od výrobců. Ti udávají, že průměr prvku v místě dosedací plochy, by měl být obroben s přesností h11 [26]. Drsnost povrchu je v tomto případě velmi důležitá. Při malé drsnosti, by docházelo k nárůstu teploty způsobeným nedostatečným mazáním. V případě příliš vysoké teploty by mohlo docházet k nadměrnému opotřebovávání a následnému zkrácení životnosti. Proto je vhodné zvolit z rozsahu drsností Ra 0,2 až 0,8 μm v závislosti na použití. Pro tento případ uložení vystačí drsnost povrchu o velikosti Ra 0,8 μm .

U výše zmíněného prvku je vhodné předepsat geometrickou toleranci válcovitosti. Velikost tolerančního pole opět závisí na průměru tolerované plochy a jejím stupni přesnosti. S ohledem na rozměrové tolerance a následnou kontrolu součásti, je pro tento případ dostatečnou velikost tolerančního pole 40 μm .

Válcová dosedací plocha pro uložení řemenice

Řemenice, jejíž uložení se nachází na válcovém konci hřídele, je zajištěna proti axiálnímu pohybu maticí a šroubem s šestihrannou hlavou. Pro její uložení je zvolena tolerance h6, díky níž vznikne soustava základního hřídele, která následně pomocí tolerování náboje, umožní získat potřebné uložení [5]. Doporučená drsnost tohoto povrchu v závislosti na průměru a tolerančním stupni, je dle normy Ra 0,8 μm . Pro tento případ uložení vystačí drsnost povrchu Ra 1,6 μm .

U tohoto prvku je vhodné zvolit geometrickou toleranci válcovitosti a celkového házení. Pro toleranci válcovitosti vychází z výpočtu s ohledem na rozměrové tolerance a drsnost povrchu, nejvhodněji zvýšená relativní geometrická přesnost. Z důvodu následné kontroly konvenčními měřidly, vystačí pro tento případ normální relativní geometrická přesnost, s velikostí tolerančního pole 4 μm . Pro geometrickou toleranci celkového házení je toleranční pole opět závislé na průměru plochy prvku a jeho stupni přesnosti, tudíž má toleranční pole velikost 16 μm . Pro toleranci celkového házení je vhodné jako základnu zvolit společnou osu mezi válcovými dosedacími plochami ložisek.

Válcová dosedací plocha pro uložení oběžného kola ventilátoru

Oběžné kolo, stejně jako řemenice, je uloženo na válcovém konci hřídele. Je opět zajištěno proti axiálnímu pohybu pomocí matice a šroubu s šestihrannou hlavou. Pro uložení tohoto oběžného kola je zvolena tolerance h7. Opět zde vznikne soustava základního hřídele, kde je možné pomocí tolerování náboje zvolit vhodné uložení. Doporučená drsnost tohoto povrchu je dle normy Ra 1,6 μm .

Pro uložení oběžného kola ventilátoru je opět využita tolerance válcovitosti a celkového házení. Volba velikostí a základny probíhá stejně jako u tolerování válcové plochy pro uložení řemenice.

Drážky pro pero těsné

Spojení hřídele s nábojem za účelem přenosu kroutícího momentu, je uskutečňováno pomocí pera těsného. Drážka pro pero má dva charakteristické rozměry, které je třeba tolerovat. Šířku a hloubku. Jelikož je pero těsné normalizovaná součást, je vhodné při volbě tolerancí vycházet z normy ČSN 02 2507 [24]. Pro pera těsná se využívá uložení s přesahem, z čehož vyplývá tolerance šířky drážky P9. Díky tomuto uložení dochází k přenosu kroutícího momentu po celé ploše pera těsného. Pro hloubku drážky norma předepisuje mezní úchylku v mezích 0 až -0,2 mm. Drsnost povrchu opět vychází z normy, kde dno drážky má předepsanou hodnotu Ra 6,3 μm a stěny drážky Ra 3,2 μm .

U drážky pro pero těsné je vhodné předepsat toleranci souměrnosti. Velikost tolerančního pole je závislá na šířce drážky. Obě drážky mají šířku 8 mm, z čehož vyplývá velikost tolerančního pole 40 μm . Jako základna pro tuto toleranci je využita osa prvku, na kterém drážka leží.

Závěrem využijeme pátého kroku, ve kterém zkontrolujeme všechny předepsané tolerance. V této fázi je nutné se na součást podívat opět jako na celek, jestli všechny předepsané tolerance dávají smysl nebo nejsou předepsány duplicitně.

4.3 Kontrola předepsaných geometrických tolerancí

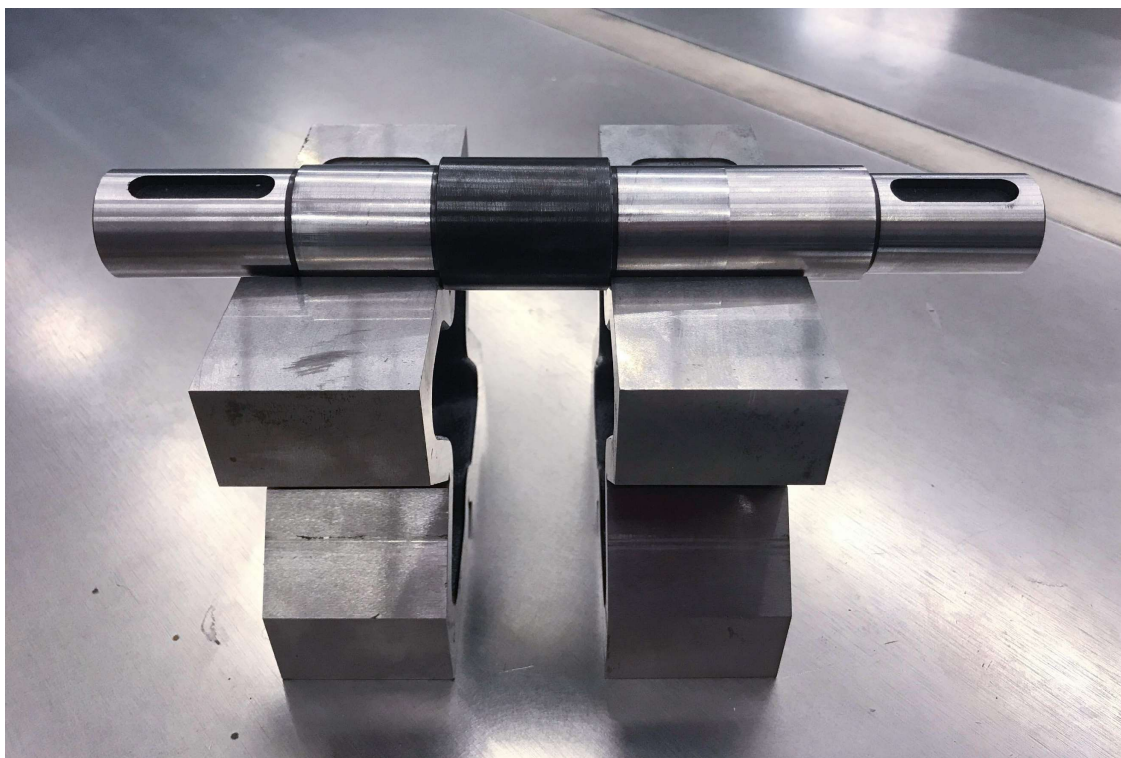
Vyrobená součást musí projít výstupní kontrolou předepsaných rozměrů. Bez tohoto kroku nelze vyhodnotit správnost a přesnost její výroby, která je dle výkresové dokumentace požadována.

4.3.1 Popis měření geometrických tolerancí

Pro kontrolu předepsaných geometrických tolerancí na hřídeli radiálního ventilátoru, bylo využito dvou prizmatických podstavců, mechanického a hydraulického stojánku pro uchycení úchylkoměru a dvou úchylkoměrů. První úchylkoměr byl značky Käfer s přesností 0,001 mm, druhým byl páčkový úchylkoměr Asimeto s přesností měření 0,01 mm.

Ustavení hřídele do prizmatických podstavců

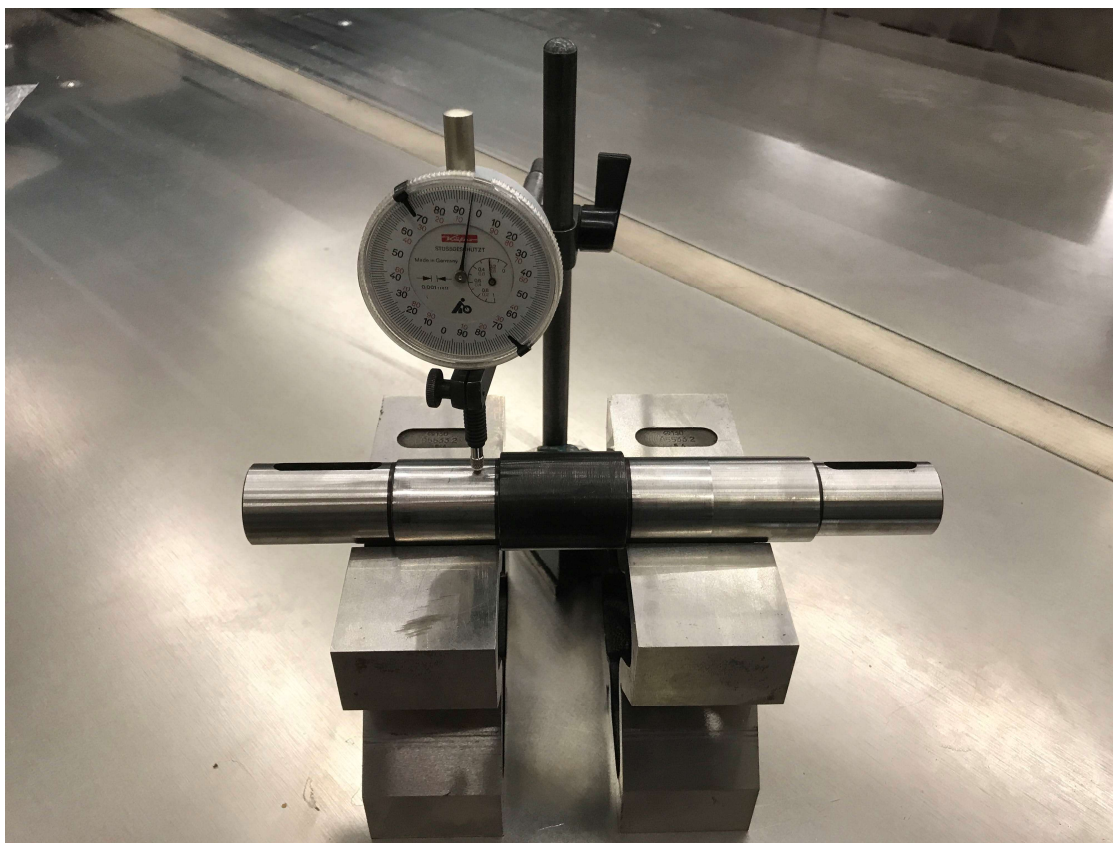
Pro správnost měření bylo nutné natočení prizmatických podstavců na stejný V-profil. Následně do nich byla uložena hřídel v místě stejných průměrů, což byly dosedací plochy pro uložení ložisek (obr. 4-3).



obr. 4-3 Ustavená hřídel v prizmatických podstavcích

Popis měření jednotlivých geometrických tolerancí

Prvním měřeným prvkem byla dosedací plocha pro levé ložisko. Konkrétně tolerance válcovitosti s tolerančním polem o velikost $4\text{ }\mu\text{m}$. Tuto toleranci lze rozdělit na tolerance kruhovitosti a přímosti. Tudíž byla prvotně změřena kruhovitosť pomocí úchylkoměru Käfer uchyceného v mechanickém stojánku. Úchylkoměr byl nastaven tak, aby se dotýkal kolmo na měřený povrch. Pro přesné měření bylo pomocí stavěcího šroubu posunuto úchylkoměrem přes dotyk. V případě vynechání tohoto kroku, by mohlo dojít ke vzdálení úchylkoměru od měřeného povrchu a následnému zkreslení výsledné odchylky. Otočením hřídele kolem své osy v prizmatických podstavcích, zjištěním maximálního a minimálního vychýlení ručičky úchylkoměru, byly naměřeny jednotlivé tolerance kruhovitosti po celé délce této plochy (obr. 4-4). Následně byla změřena přímost plochy. Měření bylo provedeno taktéž pomocí úchylkoměru Käfer. I v tomto případě se úchylkoměrem najelo přes dotyk, pro zajištění nezkresleného měření. Úchylkoměrem se proměřila celá délka měřeného prvku. Tento krok byl proveden čtyřikrát, vždy po otočení hřídele o 90° . Výsledná velikost úchyly je absolutním rozdílem minimální a maximální naměřené hodnoty v jednom kroku, což v tomto případě bylo $4\text{ }\mu\text{m}$.



obr. 4-4 Měření tolerance válcovitosti dosedací plochy pro uložení ložiska

Všechny ostatní tolerance válcovitosti, vyjma válcovitosti dosedací plochy hřídelového těsnícího kroužku, byly měřeny výše zmíněným způsobem. Při kontrole předepsaných tolerancí byla zjištěna správnost výroby. Konkrétně byly naměřeny hodnoty u dosedací plochy pravého ložiska 2 μm , u dosedací plochy řemenice 4 μm a u dosedací plochy oběžného kola 5 μm .

Tolerance válcovitosti dosedací plochy pro uložení hřídelového těsnícího kroužku byla kontrolována páčkovým úchylkoměrem Asimeto uchyceným v hydraulickém stojánku. I v tomto případě se prvotně měřila tolerance kruhovitosti a následně tolerance přímosti. Výslednou velikostí úchylky byl absolutní rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou odchylkou, což v tomto případě byla velikost 20 μm .

Pro kontrolu tolerance čelního kruhového házení byl opět použit páčkový úchylkoměr Asimeto. Aby bylo zajištěno přesného měření, bylo nutné ustavit tento úchylkoměr rovnoběžně s kontrolovanou plochou. Pro nezkreslené hodnoty měření bylo rovněž posunuto úchylkoměrem přes dotyk. Samotné měření bylo provedeno otáčením hřídele v prizmatických podstavcích (obr. 4-5). Díky tomuto pohybu byly naměřeny jednotlivé tolerance kruhovitosti po celé ploše. Výsledná velikost odchylky od ideálního tvaru byla 10 μm .



obr. 4-5 Měření kruhového házení opěrných ploch ložiska

Celková tolerance obvodového házení na válcových plochách pro uložení řemenice a oběžného kola ventilátoru, byla kontrolována opět úchylkoměrem Käfer. Pomocí otáčení a souběžného posouvání hřídele v prizmatických podstavcích, byly naměřeny maximální a minimální hodnoty úchyly. Z absolutního rozdílu těchto hodnot vyšla odchylka pro dosedací plochu oběžného kola 18 μm a pro dosedací plochu řemenice 10 μm .

Bohužel toleranci souměrnosti drážek pro pero nebylo možné zkontrolovat, z důvodu absence kalibru a nekonvenčních přístrojů.

4.3.2 Vyhodnocení kontrolované součásti

Mnou kontrolovaná hřídel radiálního ventilátoru, prošla z hlediska geometrických tolerancí výstupní kontrolou. Všechny navržené tolerance v kapitole 4.2.2 byly na vyrobené součásti dodrženy. Nefunkční prvky na výstupní kontrole nebyly kontrolovány, jelikož funkce součásti i při nedodržení všeobecných tolerancí není ohrožena.

5 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vytvoření rešerše v oblasti měření a vyhodnocování geometrických tolerancí na vybraném vzorku. Pro splnění tohoto cíle bylo nutné nastudování dostupných norem zabývajících se touto problematikou. Hlavním zdrojem informací byla norma ČSN EN ISO 1101, ve které je velmi obsáhle popsán předpis všech geometrických tolerancí. Díky tomuto studiu se podařilo dosáhnout i dílčích cílů práce, mezi které bylo zařazeno: popsání definic a principů měření geometrických tolerancí dle aktuálních norem, popsání vztahu mezi geometrickými a délkovými tolerancemi a popsání měřidel a měřicích přístrojů.

Další dílčí cíl, aplikace vybrané metody měření a vyhodnocení pro konkrétní vzorek, je rozebrán v kapitole s názvem diskuze. Zde byla vytvořena obecná metoda volby geometrických tolerancí pro jednotlivé strojní součásti. Zmíněná metoda byla následně aplikována na hřídel radiálního ventilátoru. Předepsané hodnoty byly následně zkontrolovány pomocí konvenčních metod měření. Výstupem bakalářské práce je také výkres hřídele radiálního ventilátoru, ve které jsou zaznamenány zvolené rozměrové a geometrické tolerance.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUSTED, Ernie. GD&T, MANUFACTURING IMPERATIVE. *Quality* [online]. Troy: BNP Media, 2019, **58**(3), 24-25 [cit. 2019-05-05]. ISSN 03609936. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2190395239/>
- [2] PEŠIČKA, Ladislav. Problematika uplatnění norem strojírenských tolerancí v praxi. *Česká společnost pro technickou normalizaci a.s.* [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://www.cstn.cz/index.php/prednasky#>
- [3] Tolerování rozměrů, základní pojmy. *Střední škola automobilní Ústí nad Orlicí* [online]. Ústí nad Orlicí: Ing. Jaromír Folvarčný, 2017 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2017/09/Tolerovani_rozmeru-zakladni_pojmy.pdf
- [4] BUDYNAS, Richard a J. NISBETT. *Shigley's Mechanical Engineering Design* [online]. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2006 [cit. 2019-04-28]. ISBN 978-0-07-339820-4. Dostupné z: <https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/mechanical-disgin-shigley.pdf>
- [5] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. Doplněné vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2016, 230 stran : ilustrace. ISBN 978-80-7204-921-9.
- [6] ČSN EN ISO 1101 (01 4120): *Geometrické specifikace výrobků (GPS) - Geometrické tolerování – Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [7] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 183 s. : il. ; 30 cm. ISBN 978-80-214-4010-4.
- [8] Úchylky tvaru. *ELUC* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1099>
- [9] *Engineering essentials* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://www.engineeringessentials.com/gdt/>

- [10] Roundness Testing. *ENotes: Manufacturing Processes* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: http://engineeronadisk.com/notes_manufact/round.html
- [11] *GD&T Basics* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.gdandtbasics.com/>
- [12] Sinusové pravítko. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sinusov%C3%A9_prav%C3%ADtko
- [13] *UNIMETRA* [online]. Ostrava: UNIMETRA [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.unimetra.cz/>
- [14] Souřadnicové měřicí stroje. *Katedra výrobních systémů a automatizace* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci - Fakulta strojní [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [15] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 978-80-248-0671-6.
- [16] *Pro export plus* [online]. Praha [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: http://www.proexport.cz/katalog/merici-nastroje/merici-a-opticke-pristroje/642-05-3_dilensky-merici-mikroskop-am-2/
- [17] *Metrotest* [online]. Kladno [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.metrotest.cz/pristroje-pro-mereni/profilprojektory/horizontalni-profilprojektory/>
- [18] *Dílenský kruhoměr RA - 10* [online]. České Budějovice: KUBOUŠEK Technologies and Instruments [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.kubousek.cz/cz/divize-pristroje/mitutoyo/merici-stroje-a-systemy-mitutoyo/pristroje-pro-mereni-tvarovych-odchylek/dilensky-kruhomer-ra-10.html>
- [19] *Laserový interferometr LASERTEX* [online]. Praha: DEOM [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://www.deom.cz/laserovy-interferometr-lasertex/>
- [20] *Jak funguje interferometrický systém?* [online]. Brno: Renishaw, c2001-2019 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/jak-funguje-interferometricky-system--38612>

- [21] KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT. *Technické kreslení*. 2. opr. vyd. Brno: Computer Press, 2012, 252 s. : il. ISBN 978-80-251-1887-0.
- [22] ČSN EN ISO 8015 (01 4204): *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Základy – Pojmy, principy a pravidla*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [23] ČSN ISO 2768-2: *Všeobecné tolerance Část 2 - Nepředepsané geometrické tolerance*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994.
- [24] SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Doplněné vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2016, 234 stran : ilustrace. ISBN 978-80-7204-838-0.
- [25] Valivá ložiska: Katalog výrobků. *SKF CZ, a.s* [online]. 2019 [cit. 2020-06-21].
- [26] Hřídelová těsnění: Katalog výrobků. *SKF CZ, a.s* [online]. 2012 [cit. 2020-06-21].
- [27] Talyrond 450: Heavy duty roundness. *Taylor Hobson* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/product%20downloads/large%20capacity%20roundness/talyrond_450_lowres_en.pdf?la=en

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

GPS Geometrické specifikace produktu

SMS Souřadnicové měřicí stroje

D_{min}, D_{max} Mezní rozměry díry

d_{min}, d_{max} Mezní rozměry hřídele

l_r Základní délka

R_a Parametr drsnosti

$Z(x)$ Hodnota pořadnice

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 2-1	Využití tolerancí; a) vyrobená součást bez využití jakýchkoliv tolerancí; b) příklad předpisu tolerancí pro zpřesnění výroby [4]	15
obr. 3-1	Příklady tolerančních polí; toleranční pole tvořeno a) dvěma přímkami; b) mezikružím; c) dvěma rovinami; d) dvěma souosými válci; e) válcem [5].....	17
obr. 3-2	Možnosti předpisu tolerančních rámečků	18
obr. 3-3	Příklad omezení tolerance mezi body J a K [6]	18
obr. 3-4	Možnosti umístění základny; a) na obrysovou čáru; b), c) na kótovací čáru...	19
obr. 3-5	Společná základna tvořená dvěma prvky [5]	19
obr. 3-6	Předpis cílené základny tvořené malou plochou	20
obr. 3-7	Rozdíl v měření při změně základny [5].....	20
obr. 3-8	Příklad předpisu teoreticky přesných rozměrů.....	21
obr. 3-9	Rozdělení geometrických tolerancí	22
obr. 3-10	Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci přímosti; a) dvěma rovinami; b) válcem [6]	23
obr. 3-11	Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci rovinnosti [6]	23
obr. 3-12	Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci kruhovitosti [6].....	24
obr. 3-13	Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci válcovitosti [6].....	24
obr. 3-14	Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci profilu čáry; a) pro prvek nevztahený k základně; b) pro prvek vztahený k základně [6]	25
obr. 3-15	Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci profilu plochy; a) pro prvek nevztahený k základně; b) pro prvek vztahený k základně [6]	25
obr. 3-16	Předpis a vymezení tolerančního pole pro rovnoběžnost přímky k základně tvořené přímkou; a) dvěma rovinami; b) válcem [6].....	26
obr. 3-17	Předpis a vymezení tolerančního pole pro rovnoběžnost přímky k základně tvořené plochou [6]	27
obr. 3-18	Předpis a vymezení tolerančního pole pro rovnoběžnost plochy k základně tvořené přímkou [6]	27
obr. 3-19	Předpis a vymezení tolerančního pole pro rovnoběžnost plochy k základně tvořené plochou [6]	27
obr. 3-20	Předpis a vymezení tolerančního pole pro kolmost přímky k základně tvořené přímkou [6]	28

obr. 3-21	Předpis a vymezení tolerančního pole pro kolmost přímky k základně tvořené plochou [6]	28
obr. 3-22	Předpis a vymezení tolerančního pole pro kolmost plochy k základně tvořené přímkou [6]	29
obr. 3-23	Předpis a vymezení tolerančního pole pro kolmost plochy k základně tvořené plochou [6]	29
obr. 3-24	Předpis a vymezení tolerančního pole pro sklon přímky k základně tvořené přímkou [6]	30
obr. 3-25	Předpis a vymezení tolerančního pole pro sklon přímky k základně tvořené plochou [6]	30
obr. 3-26	Předpis a vymezení tolerančního pole pro sklon plochy k základně tvořené přímkou [6]	31
obr. 3-27	Předpis a vymezení tolerančního pole pro sklon plochy k základně tvořené plochou [6]	31
obr. 3-28	Předpis a vymezení tolerančního pole pomocí koule u tolerance polohy bodu [6]	32
obr. 3-29	Předpis a vymezení tolerančního pole u tolerance polohy přímky [6]	32
obr. 3-30	Předpis a vymezení tolerančního u tolerance polohy rovinné plochy nebo střední roviny [6]	33
obr. 3-31	Předpis a vymezení tolerančního pole u tolerance soustřednosti bodu [6]...	33
obr. 3-32	Předpis a vymezení tolerančního pole u tolerance souososti bodu [6]	34
obr. 3-33	Předpis a vymezení tolerančního pole u tolerance souměrnosti [6]	34
obr. 3-34	Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci kruhového obvodového házení [6]	35
obr. 3-35	Předpis a vymezení tolerančního pole pro kruhové čelní házení [6]	35
obr. 3-36	Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci kruhového házení v libovolném směru [6]	36
obr. 3-37	Předpis a vymezení tolerančního pole pro toleranci kruhového házení v daném směru [6]	36
obr. 3-38	Předpis a vymezení tolerančního pole pro celkové obvodové házení [6]	37
obr. 3-39	Předpis a vymezení tolerančního pole pro celkové čelní házení [6]	37
obr. 3-40	Měření tolerance přímosti pomocí nožového pravítka	39
obr. 3-41	Měření tolerance rovinnosti pomocí úchylkoměru [9]	39

obr. 3-42	Měření kruhovitosti pomocí úchylkoměru [10]	40
obr. 3-43	Měření rovnoběžnosti pomocí úchylkoměru [11]	41
obr. 3-44	Měření kolmosti pomocí úchylkoměru [11].....	41
obr. 3-45	Měření sklonu pomocí sinusového pravítka [12].....	42
obr. 3-46	Měření celkového obvodového házení [11]	42
obr. 3-47	Měření kruhového obvodového házení	43
obr. 3-48	Kalibr pro měření drážek na hřídeli [13]	43
obr. 3-49	Rozdělení SMS podle konstrukce [15].....	44
obr. 3-50	Dílenský měřicí mikroskop AM 2 [16]	45
obr. 3-51	Vertikální stolní profilprojektor [17]	45
obr. 3-52	Dílenský kruhoměr RA-10 s otočným stolem [19]	46
obr. 3-53	Základní princip funkce Michelsonova interferometru [21].....	46
obr. 3-54	Rozložení tolerančních intervalů vzhledem k nulové čáře [22]	49
obr. 3-55	Čtyři třídy přesnosti dle normy ČSN ISO 2768-1 [22]	49
obr. 3-56	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [22].....	50
obr. 3-57	Vztah tolerancí kruhovitosti a tolerancí rozměru [5].....	51
obr. 3-58	Válcový konec hřídele pro kluzné ložisko	52
obr. 3-59	Modifikátory závislých tolerancí.....	53
obr. 3-60	Předpis požadavku obalové plochy [22].....	53
obr. 3-61	Předpis požadavku maxima materiálu [22]	54
obr. 3-62	Předpis požadavku minima materiálu [22].....	54
obr. 3-63	Předpis požadavku reciprocity	55
obr. 4-1	Řez uložením hřídele radiálního ventilátoru.....	58
obr. 4-2	Vyznačení funkčních prvků na hřídeli ventilátoru	59
obr. 4-3	Ustavená hřídel v prizmatických podstavcích	62
obr. 4-4	Měření tolerance válcovitosti dosedací plochy pro uložení ložiska	63
obr. 4-5	Měření kruhového házení opěrných ploch ložiska	64

9 SEZNAM PŘÍLOH

Hřidel ventilátoru A3-01-191733