



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

METODY MĚŘENÍ A ANALÝZA VÝROBNÍ PŘESNOSTI

MEASUREMENT TECHNIQUES AND EVALUATION OF DIMENSIONAL ACCURACY IN MANUFACTURING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Matuška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dana Foltýnová

BRNO 2026

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Václav Matuška**
Studijní program: Základy strojíního inženýrství
Studijní obor: Základy strojíního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Dana Foltýnová**
Akademický rok: 2025/26

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:

Metody měření a analýza výrobní přesnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné strojírenské praxi je přesné měření rozměrů a geometrických tolerancí klíčové pro zajištění kvality a funkčnosti výrobků. Nedodržení stanovených tolerancí může vést k neshodě, poruchám v provozu nebo zmetkovitosti. Proto je důležité zaměřit se na praktické ověření shodnosti výrobku s výkresovou dokumentací pomocí vhodných metod měření a vyhodnocení, čímž se přispívá ke zvyšování přesnosti a spolehlivosti výrobního procesu.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provést detailní analýzu metod měření rozměrů a geometrických tolerancí vybrané součásti a následně syntetizovat znalosti při měření na reálné součásti.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popsat problematiku geometrických tolerancí, principů měření a norem v oblasti kontroly jakosti,
- navrhnout metodiku měření rozměrů a geometrických odchylek na reálné součásti,
- provést měření na reálné součásti a vyhodnotit shodu s výkresovou dokumentací,
- zpracovat a analyzovat získané výsledky,
- provést rešerši měřících protokolů používaných v průmyslu a sepsat správné náležitosti.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, laboratorní protokol.

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

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

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncení/>

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.

PETR, K.: Geometrické tolerance dle ISO GPS. 1.vydání, Verlag Dashofer, Praha 2019, 164 s,
ISBN 978-80-7635-019-9

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá metodami měření a analýzou výrobní přesnosti v rámci systému geometrických specifikací produktu (GPS). Cílem je kriticky porovnat různé metrologické přístupy při kontrole rozměrových a geometrických tolerancí na konkrétní součásti. K měření a vyhodnocení rozměrů a tvaru byla využita konvenční dílenská měřidla, souřadnicový měřicí stroj (CMM) a optický 3D skener. Výsledkem je vyhodnocení shody reálné součásti s výkresovou dokumentací a srovnání naměřených dat z hlediska jejich interpretace a přesnosti. Práce nabízí ucelený pohled na jednotlivé měřicí metody a slouží jako podklad pro volbu optimální metodiky v průmyslové praxi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Geometrické tolerance, GPS, Toleranční pole, Metrologie, Optické 3D skenování

ABSTRACT

The thesis deals with measurement methods and the analysis of manufacturing accuracy within the framework of the Geometrical Product Specifications (GPS) system. The aim is to critically compare various metrological approaches used for the inspection of dimensional and geometric tolerances on a specific component. Conventional workshop measuring instruments, a coordinate measuring machine (CMM), and an optical 3D scanner were employed to measure and evaluate dimensions and form. The outcome of the thesis is an assessment of the conformity of the actual component with the engineering drawing documentation, along with a comparison of the measured data in terms of their interpretation and accuracy. The thesis provides a comprehensive overview of the individual measurement methods and serves as a basis for selecting the most suitable methodology for industrial practice.

KEYWORDS

Geometric tolerances, GPS, Tolerance zone, Metrology, Optical 3D scanning

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MATUŠKA, Václav. *Metody měření a analýza výrobní přesnosti*. Bakalářská práce. Ing. Dana FOLTÝNOVÁ (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/173400>.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl upřímně poděkovat vedoucí své práce, Ing. Daně Foltýnové, za její odborné vedení, cenné připomínky k řešené problematice, poskytnuté studijní materiály a vstřícný přístup. Mé poděkování patří rovněž Ing. Petru Křivohlavému za odbornou asistenci a čas věnovaný měření a digitalizaci součásti pomocí 3D skeneru.

Závěrem bych rád vyjádřil velký vděk své rodině a blízkým za jejich neutuchající podporu a zázemí, které mi poskytovali během celého studia. Největší dík pak patří mé přítelkyni za její neustálou oporu, pochopení a povzbuzení ve chvílích, kdy jsem to nejvíce potřeboval.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Dany Foltýnové. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů. Nástroj generativní AI (Gemini, Google) jsem použil v omezeném rozsahu pro konzultaci struktury, jazykovou korekturu a stylistické přeformulování mnou napsaných odstavců. AI nebyla použita k vytváření odborných tvrzení ani k nahrazení práce se zdroji. Veškeré formulace jsem po korektuře zkontroloval a odpovědnost za obsah nesu já.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	11
2.1	Analýza problému	11
2.2	Cíl práce	11
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	12
3.1	Princip nezávislosti	12
3.2	Rozměrové tolerance	12
3.2.1	Tolerování délkových rozměrů	13
3.2.2	Soustavy uložení	13
3.2.3	Tolerování úhlových rozměrů	14
3.3	Geometrické tolerance	15
3.3.1	Tolerované a odvozené prvky	16
3.3.2	Toleranční pole	16
3.3.3	Základny a soustavy základů	17
3.3.4	Indikace geometrických tolerancí	18
3.3.5	Teoreticky exaktní rozměr (TED)	19
3.3.6	Vymezení rozsahu tolerovaného prvku	20
3.3.7	Tolerance tvaru	21
3.3.8	Tolerance orientace	24
3.3.9	Tolerance umístění	26
3.3.10	Tolerance házení	29
3.4	Závislé tolerance	31
3.4.1	Požadavek obalové plochy Ⓔ	32
3.4.2	Požadavek maxima materiálu Ⓜ	32
3.4.3	Požadavek minima materiálu Ⓛ	33
3.4.4	Požadavek reciprocity Ⓡ	34
3.5	Metody měření a analýza výrobní přesnosti	34
3.5.1	Konvenční dílenská měřidla	34
3.5.2	Pevné mezní kalibry	35
3.5.3	Přístroje pro měření geometrických tolerancí	36
3.5.4	Souřadnicové měřicí stroje	37
3.5.5	Optické 3D skenery	38
3.6	Měřicí protokoly	39

3.6.1	Protokoly pro konvenční měření	39
3.6.2	Protokoly pro souřadnicové měřicí stroje (CMM)	41
4	DISKUZE	42
4.1	Návrh měřené součásti	42
4.2	Měřicí zařízení	45
4.3	Vyhodnocení referenčního měření výrobce	48
4.4	Vyhodnocení dílenského měření	48
4.4.1	Rozměrové tolerance	49
4.4.2	Geometrické tolerance	49
4.5	Vyhodnocení měření optickým 3D skenerem	54
4.5.1	Vliv zmatňujícího spreje	58
5	ZÁVĚR	60
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
7	SEZNAM PŘÍLOH	63

1 ÚVOD

V současné strojírenské praxi je kladen neustále se zvyšující důraz na kvalitu, funkčnost a plnou zaměnitelnost jednotlivých komponent. S rozvojem moderních výrobních technologií a rostoucí komplexností strojních zařízení se precizní měření rozměrů a geometrických specifikací stává nezbytným předpokladem pro zajištění spolehlivého chodu celých mechanismů. Samotná výrobní přesnost již není chápána pouze jako dodržení délkových rozměrů, ale zahrnuje širokou oblast geometrických specifikací produktů, které definují mezní odchylky tvaru, orientace, umístění a házení či závislých tolerancí.

Nedodržení těchto stanovených tolerancí může v praxi vést k řadě negativních jevů, od poruch v provozu a nadměrného opotřebení až po vznik neshodných kusů či vysokou zmetkovitost. Je proto klíčový nejen správný návrh stanovení tolerancí, ale také jejich následné praktické ověření pomocí vhodných metod měření a vyhodnocení.

Tato bakalářská práce do problematiky nahlíží prostřednictvím praktického měření. Na příkladu reálné strojní součásti – stupňovité hřídele navržené do převodového ústrojí – se práce věnuje porovnání tří odlišných metrologických přístupů. Klasické dílenské měření pomocí úchylkoměrů a přípravku je zde porovnáno s moderní bezkontaktní metodou optického 3D skenování a s vysoce přesným referenčním měřením na třísouřadnicovém měřicím stroji (CMM). Práce tak nabízí ucelený pohled na to, jak rozdílné technologie měření interpretují stejnou geometrii a jaká jsou jejich specifika při vyhodnocování výrobní přesnosti.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

V reálném výrobním procesu je dosažení absolutní geometrické a rozměrové shody s ideálním modelem prakticky nemožné. Každý vyrobený kus vykazuje určité odchylky, které jsou důsledkem kombinace technologických limitů, stavu výrobního zařízení a vlivů vnějšího prostředí či lidského faktoru. K definování mezí těchto nevyhnutelných nedostatků, které ještě neohrožují výslednou funkci celku, se využívá systému rozměrového a geometrického tolerování. Je však podstatné rozlišovat mezi rozměrovými tolerancemi a specifikacemi geometrickými, neboť samotná kontrola rozměrů neposkytuje dostatečnou informaci o skutečném tvaru povrchů součástí.

S narůstajícími odchylkami od ideálního stavu se zvyšuje riziko komplikací při montáži či ztráty plné smontovatelnosti a zaměnitelnosti součástí v rámci sestavy. Aby bylo možné tyto vlivy minimalizovat, musí konstruktér i metrolog pracovat v souladu se systémem geometrických specifikací produktu. Tento standardizovaný systém nabízí jednotný jazyk pro popis geometrie a stanovuje pravidla nejen pro její předepisování v dokumentaci, ale i pro následné vyhodnocování. Pochopení těchto principů a příslušných norem je nezbytným předpokladem pro korektní interpretaci kvality výroby a predikci chování součástí v provozu.

2.2 Cíl práce

Hlavním cílem je provedení komplexní analýzy metod měření rozměrů a geometrických tolerancí, která je následně demonstrována na praktickém ověření výrobní přesnosti reálné součásti. K naplnění tohoto záměru je nezbytné nejprve teoreticky ukotvit problematiku geometrických specifikací produktů a příslušných norem, navrhnout metodiku měření součásti a následně provést samotnou kontrolu shody s výkresovou dokumentací za využití různorodého přístrojového vybavení. Důraz je kladen na následné zpracování a kritické porovnání dat získaných odlišnými metodami měření, což je doplněno o rešerši formálních náležitostí měřicích protokolů běžně užívaných v průmyslové praxi pro prokazování kvality výroby.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Princip nezávislosti

Princip nezávislosti definován normou ISO 8015 určuje, že každá předepsaná tolerance na výkrese musí být splněna samostatně a nezávisle na ostatních tolerancích, pokud není specifikováno jinak. To znamená, že rozměrová tolerance lineárního rozměru neomezuje geometrické tolerance daného prvku. Například u válcové součásti definuje rozměrová tolerance pouze přípustné úchytky místních průměrů zjištěných dvoubodovým měřením, ale nezpůsobuje žádné omezení vůči přímosti nebo kruhovitosti. Tyto geometrické charakteristiky musí být v případě potřeby ošetřeny vlastními nezávislými tolerancemi, jak bude v textu uvedeno níže [1].

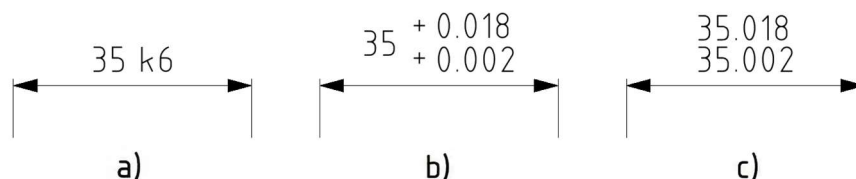
Závislé tolerance © ® ℓ ® porušující princip nezávislosti jsou uvedeny v kapitole 3.4.

3.2 Rozměrové tolerance

Rozměrové tolerance definují přípustné odchylky skutečných rozměrů od jejich teoretických jmenovitých hodnot. Jejich správná aplikace je nezbytná pro zajištění požadované funkčnosti, bezproblémové sestavitelnosti a plné zaměnitelnosti navazujících strojních dílů. Základní pravidla pro specifikaci těchto rozměrů a systém lícování jsou ukotvena v normách řady ČSN EN ISO 286. Rozměrová tolerance vymezuje povolené pásmo ležící mezi horním a dolním mezním rozměrem, ve kterém se musí nacházet skutečný rozměr vyrobeného prvku. Nedodržení těchto předepsaných hranic způsobuje narušení charakteru požadovaného uložení, což nevyhnutelně vede k nežádoucím vřlím, nadměrnému tření či k úplné nemožnosti montáže. Neobsahuje-li kótovaný prvek na výkresové dokumentaci individuálně předepsanou toleranci, automaticky se na něj vztahují všeobecné tolerance definované normou ČSN EN ISO 22081 [2; 3].

3.2.1 Tolerování délkových rozměrů

Tolerování délkových rozměrů se zaměřuje na kontrolu lineárních rozměrů, jakými jsou typicky vnější a vnitřní průměry, celkové délky, šířky či hloubky osazení. Aplikace těchto předpisů slouží primárně k řízení lokálních rozměrů uvažovaných prvků zjišťovaných metodou dvoubodového měření napříč daným průřezem. Na výkresové dokumentaci se požadovaná přesnost zapisuje buď přímým uvedením číselných hodnot horní a dolní mezní úchylky či rozměru, nebo prostřednictvím normalizovaných tolerančních tříd. Zápis pomocí tříd se skládá z písmene udávajícího polohu tolerančního pole a čísla definujícího příslušný toleranční stupeň. Velikost samotného tolerančního pole, a tedy i výslednou přesnost výroby, určuje stupeň normalizované tolerance zkratkou IT. Soustava ISO definuje celkem 20 základních stupňů přesnosti, označených IT01, IT0, IT1 až IT18. Zvolená číselná hodnota přímo definuje šířku tolerančního pásma v závislosti na jmenovitém rozměru součásti. Platí, že čím nižší je číslo tolerančního stupně, tím užší je povolené toleranční pole, což s sebou přináší vyšší nároky na použitou technologii a úměrně tomu roste i cena výroby. V souladu s principem nezávislosti omezují předepsané délkové tolerance výhradně samotný místní rozměr, a to bez ohledu na úchylky geometrického tvaru. Případné dodatečné požadavky na přesnost tvaru musí být u těchto prvků řešeny předpisem nezávislé geometrické tolerance, nebo aplikací vhodného modifikátoru [2; 3].



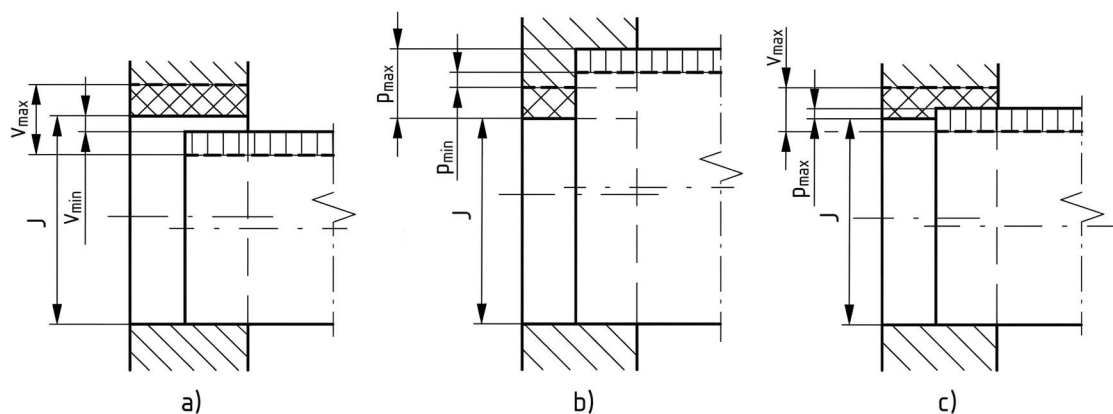
Obr. 3-1 Zápis tolerovaných rozměrů pomocí a) toleranční třídy; b) mezních úchylek; c) mezních rozměrů

3.2.2 Soustavy uložení

Uložení s vůlí – Poskytuje při montáži za všech okolností vůli mezi dírou a hřídelem. K tomuto stavu dochází, pokud je dolní mezní rozměr díry větší, nebo se v extrémním případě přesně rovná hornímu meznímu rozměru hřídele [3].

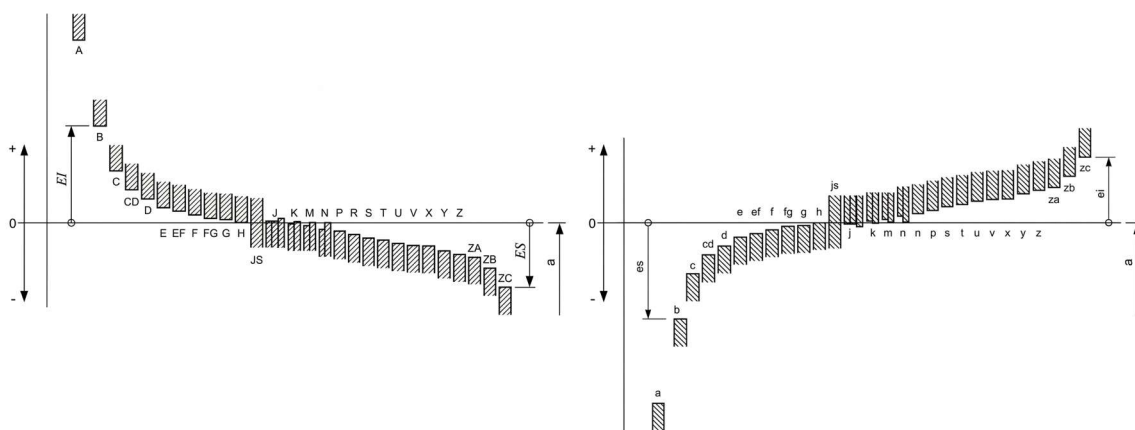
Uložení s přesahem – Zaručuje při sestavování vždy přesah mezi spojovanými prvky. Podmínkou pro vznik tohoto uložení je, aby horní mezní rozměr díry byl menší, případně v krajním případě roven dolnímu meznímu rozměru hřídele [3].

Uložení přechodné – Představuje specifický případ, kdy může v závislosti na skutečně vyrobených rozměrech obou prvků vzniknout při montáži buď vůle, nebo přesah. Z hlediska vzájemné polohy to znamená, že se toleranční intervaly díry a hřídele částečně nebo úplně překrývají [3].



Obr. 3-2 a) uložení s vůlí; b) uložení s přesahem; c) uložení přechodné [3]

Poloha tolerančního pole vůči jmenovitému rozměru, která rozhoduje o vzniku konkrétního typu uložení, se v systému ISO identifikuje prostřednictvím písmen abecedy. Použitím velkých písmen předepisujeme vnitřní rozměrové prvky či díry, zatímco vnější rozměrové prvky zapisujeme výhradně písmeny malými [2; 3].



Obr. 3-3 Toleranční intervaly díry a hřídele [2]

3.2.3 Tolerování úhlových rozměrů

Úhlové tolerance slouží k vymezení přípustné odchylky úhlu, který svírají dva posuzované prvky, jakými jsou například povrchy či rotační osy součásti. Tolerování úhlů určuje maximální a minimální povolenou úhlovou vzdálenost mezi těmito útvary. Na výkresech se jmenovité hodnoty společně s mezními úchylkami vyjadřují primárně ve stupních, minutách a vteřinách, přičemž je běžné použití desetinných čísel stupně.

3.3 Geometrické tolerance

Geometrické tolerance slouží k vymezení mezních odchylek, ve kterých se skutečné provedení součásti může lišit od ideálního geometrického tvaru, polohy, orientace či házení. Jejich použití je nezbytné zejména ve strojírenství, kde přímo ovlivňují funkci výrobku, jeho životnost, zaměnitelnost a vyměnitelnost. Zásady pro specifikaci těchto tolerancí jsou součástí normy ČSN EN ISO 1101, která tvoří jeden ze základních pilířů systému geometrických specifikací výrobků [2; 4]. Geometrická tolerance určuje oblast, ve které se musí nacházet posuzovaný prvek, přičemž tato oblast je definována jako rovinné nebo prostorové toleranční pole. Nedodržení předepsaných hodnot se v praxi může projevit například zhoršením chodu mechanismu, zvýšenou hlučností nebo nadměrným opotřebením součástí, což může vést až k nevyhovujícímu výrobku [3]. Pokud není geometrická tolerance na technickém výkresu stanovena individuálně, uplatňují se obecné tolerance definované dle normy ISO 22081 [5].

Geometrické tolerance		Značka
Tvaru	Přímost	—
	Rovinnost	
	Kruhovitost	
	Válcovitost	
	Profil čáry	
	Profil plochy	
Orientace	Rovnoběžnost	
	Kolmost	
	Sklon	
Umístění	Poloha	
	Soustřednost a souosost	
	Souměrnost	
Házení	Kruhové házení	
	Celkové házení	

Obr. 3-4 Tabulka geometrických tolerancí [6]

3.3.1 Tolerované a odvozené prvky

V systému geometrických specifikací produktů je nezbytné rozlišovat mezi prvky integrálními a odvozenými, přičemž oba tyto typy mohou existovat v podobě jmenovité nebo neideální. Jmenovitý integrální prvek představuje ideální povrch součásti definovaný výkresovou dokumentací nebo CAD modelem, jako je například dokonalá válcová plocha hřídele. Od tohoto ideálního povrchu je odvozen jmenovitý odvozený prvek, kterým je teoretický geometrický útvar v podobě dokonalé osy, středového bodu nebo střední roviny [5; 7].

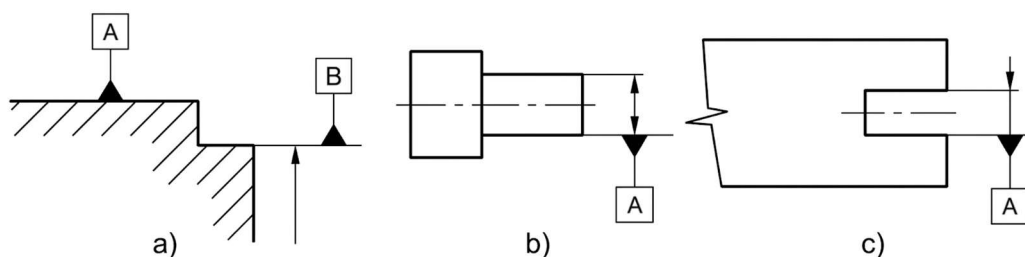
V reálném výrobním procesu se však jmenovité tvary mění na prvky neideální. Neideální integrální prvek je skutečný fyzický povrch vyrobené součásti, který vlivem výrobních procesů vykazuje tvarové odchylky a nepřesnosti. Z tohoto reálného povrchu se následně matematickými metodami stanovuje neideální odvozený prvek, kterým je například extrahovaná střední čára válce, která na rozdíl od jmenovité osy není dokonale přímá, neboť odráží skutečnou geometrii vyrobeného kusu. Porovnání neideálních prvků skutečné součásti s jejich jmenovitými vzory na výkresu je podstatou metrologického vyhodnocování výsledků kontroly geometrických tolerancí [5; 7].

3.3.2 Toleranční pole

Toleranční pole představuje vymezený prostor, ve kterém se musí nacházet celý posuzovaný neideální integrální prvek. Toleranční pole se rozděluje na plošné a prostorové. Pole je definováno jednou nebo více geometricky přesnými čarami či plochami. Samostatně uvedená číselná hodnota tolerance ohraničuje prostor dvěma rovnoběžnými prvky s předepsanou vzdáleností. Doplněním značky průměru $\varnothing$ je uvažovaný prostor kruh či válec o průměru hodnoty tolerance. Doplněním písmene S a značky průměru toleranční pole získá tvar koule [5; 8].

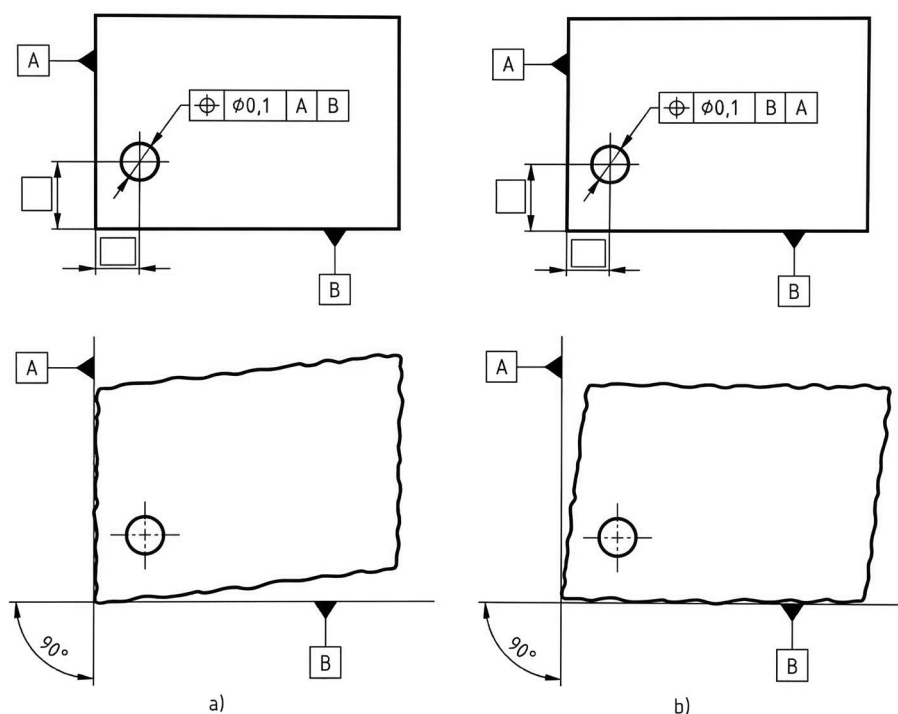
3.3.3 Základny a soustavy základen

Základna – představuje teoreticky přesný geometrický prvek, jakým je typicky ideální rovina, osa nebo bod. Slouží jako výchozí prostorová reference pro definování orientace, umístění nebo házení tolerovaných prvků na součásti. Protože skutečné vyrobené povrchy vykazují vždy určité tvarové odchylky a nepřesnosti, odvozuje se tato ideální základna od přiřazeného integrálního prvku. Tento ideální prvek se ke skutečnému neideálnímu povrchu ustavuje pomocí povrchů co nejpresnějšího tvaru, kterými jsou například průměrné desky. Základní prvek by pokud možno měl být rozměrově a tvarově tolerován. Na výkresové dokumentaci se povrch nebo rozměr tvořící základnu označuje specifickou značkou. Indikace se skládá z vyplněného nebo prázdného rovnostranného trojúhelníku připojeného k vodící čáře a z pravoúhlého rámečku obsahujícího identifikační velké písmeno abecedy [3; 9].



Obr. 3-5 Značení a umisťování základen a) na obrysovou čáru prvku nebo na její prodloužení b), c) na prodlouženou kótovací čáru, jestliže je základnou osa nebo rovina souměrnosti [3]

Soustava základen – využívá se v případech, kdy k jednoznačnému prostorovému vymezení tolerančního pole nepostačuje pouze jedna základna a je nutné součásti odebrat více stupňů volnosti. Soustava je tvořena skupinou dvou nebo tří základen, které se do třetí sekce indikátoru tolerance zapisují v přísně stanoveném pořadí [3]. Zápis zleva doprava přesně definuje: primární, sekundární a terciární základnu. Pořadí základen je zcela kritické a musí striktně odrážet funkční požadavky na součást. Záměna pořadí písmen v rámečku by vedla ke zcela odlišnému ustavení součásti při měření a k chybným výsledkům kontroly [3; 9].

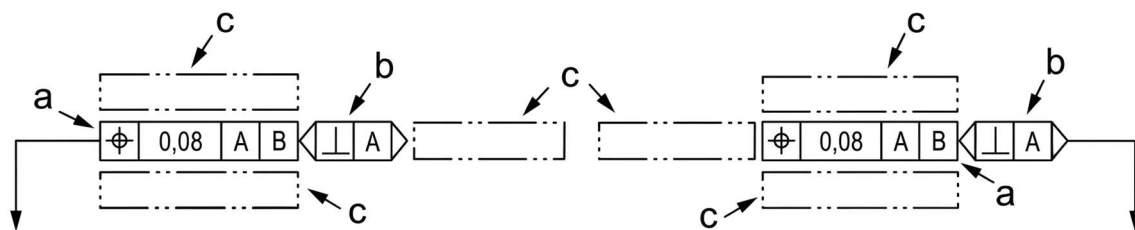


Obr. 3-6 Soustavy základen a jejich záměna pořadí a), primární základna je plocha A
b) primární základna je plocha B [3]

Společná základna – je tvořena dvěma samostatnými prvky, plnící referenční funkci současně. Tento případ se nejčastěji aplikuje u rotačních součástí pro definování společné osy uložení hřídele v ložiskách a značí se dvěma písmeny oddělenými spojovníkem, například A-B [3].

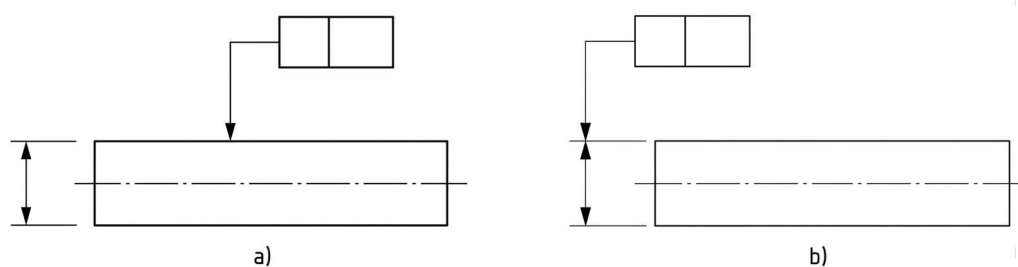
3.3.4 Indikace geometrických tolerancí

Indikátor tolerance, graficky znázorněný jako pravoúhlý rámeček, se dělí na několik sekcí řazených v pevně stanoveném pořadí zleva doprava. První část obsahuje symbol předepsané geometrické charakteristiky. Následující pole definuje celkovou hodnotu tolerance, která může být doplněna o modifikátory upřesňující tvar tolerančního pole nebo materiálové podmínky. Další pole jsou vyhrazena pro označení základen, přičemž u tolerancí tvaru se tato sekce nevyužívá, neboť nevyžadují prostorovou referenci k jinému prvku. V případě potřeby mohou být za sekcí základen doplněny indikátory roviny a prvku, jako jsou například indikátory směru prvku či orientace roviny, které umožňují přesně definovat vztah tolerance k součásti nezávisle na zvoleném průmětu [5; 8].



Obr. 3-7 Indikátor tolerance pro variantu s odkazovou čarou zleva a zprava a) indikátor tolerance; b) indikátor roviny a prvku; c) přilehlé indikace [8]

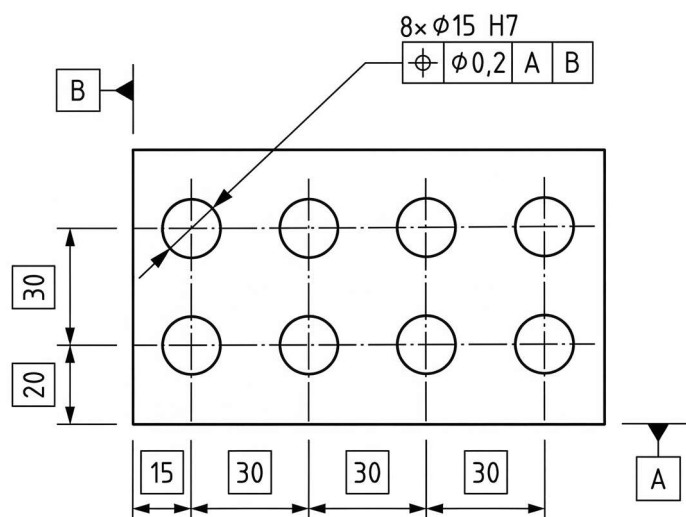
Způsob připojení odkazové čáry indikátoru tolerance k prvku jednoznačně definuje, zda je předepsaná tolerance vztažena k integrálnímu povrchu nebo odvozeného prvku. Pokud je odkazová čára umístěna přímo na obrysové čáře nebo na pomocné čáře v dostatečné vzdálenosti od kótovací čáry, je tolerovaným prvkem integrální povrch, tedy skutečný fyzický povrch součásti. V případě, že odkazová čára přímo navazuje na kótovací čáru tak, že šipka indikátoru směřuje proti šipce rozměrové kóty, stává se tolerovaným prvkem odvozený prvek. Odkazová čára indikátoru tolerance se umísťuje vždy kolmo k tolerovanému prvku [5; 8].



Obr. 3-8 Indikátor tolerance pro a) integrální povrch; b) odvozený prvek [8]

3.3.5 Teoreticky exaktní rozměr (TED)

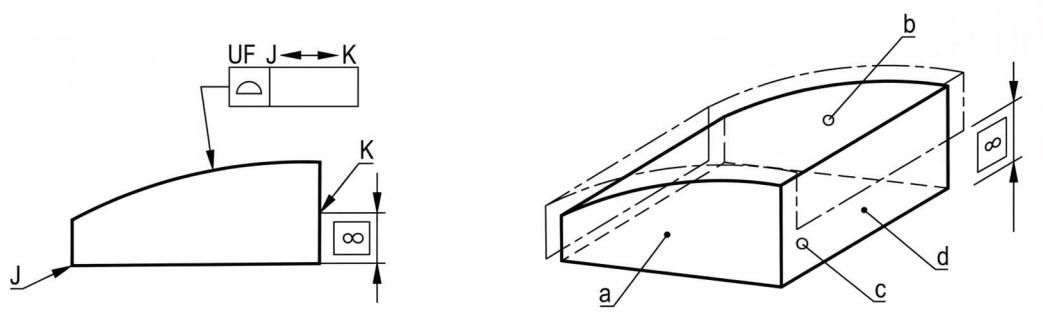
Teoreticky exaktní rozměry definují ideální sklon, polohu nebo profil prvku vzhledem k základně nebo soustavě základěn a nahrazují délkové a úhlové kótování. Na rozdíl od běžných lineárních rozměrů nemají vlastní tolerance. Tyto rozměry určují teoreticky přesné umístění geometrického tolerančního pole, ve kterém se musí nacházet skutečný prvek. Hlavní výhodou aplikace TED je zamezení sčítání tolerancí, což umožňuje jednoznačně definovat geometrii bez kumulace výrobních chyb. Další výhodou je velikost tolerančního pole – při použití tolerance polohy osy díry se zvětší toleranční pole o 57 % v porovnání s tolerováním pomocí mezních úchylek [3]. Teoreticky exaktní rozměry mohou být vyjádřeny číselně nebo vyplývat implicitně z geometrické vazby, například u pravých úhlů. Skutečná odchylka od této ideální polohy je pak omezena navazující geometrickou tolerancí, nikoliv rozměrem samotným. TED se na výkresech zapisují do pravoúhlých rámečků [3; 8].



Obr. 3-9 Indikace lineárních teoreticky exaktních rozměrů [8]

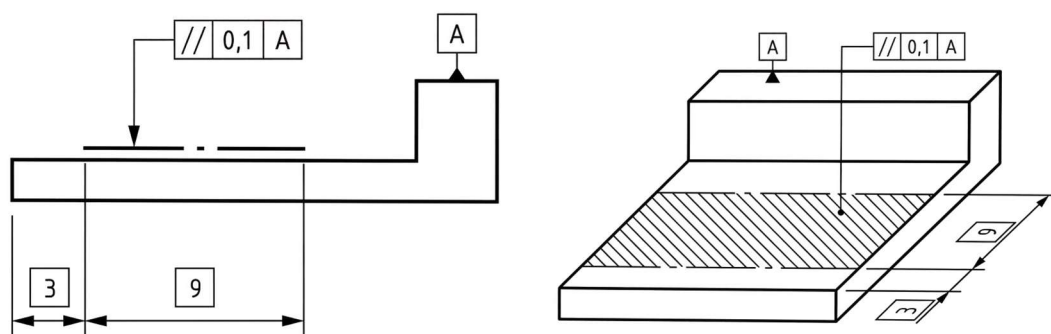
3.3.6 Vymezení rozsahu tolerovaného prvku

Spojité neuzavřený tolerovaný prvek – Aplikuje se v případech, kdy geometrická tolerance neplatí pro celý obrys součásti, ale jen pro vybranou část. Na výkresové dokumentaci se tento úsek ohraničuje velkými písmeny, například (K a L) a vyznačuje tlustou čerchovanou čarou s dlouhými čárkami. Nad tolerančním rámečkem se požadavek indikuje symbolem oboustranné šipky ($\leftrightarrow$). Poloha úseku se definuje pomocí TED [3; 8].



Obr. 3-10 Indikace průběžného neuzavřeného tolerovaného prvku [3]

Tolerance omezené plochy – Slouží k lokálnímu předepsání geometrické tolerance pouze pro specifickou oblast rozsáhlejšího povrchu. Omezená část plochy podléhající toleranci se na výkrese jasně vymezí šrafovanou oblastí, jejíž hranice opět tvoří tlustá čerchovaná čára s dlouhými čárkami. Přesné umístění a rozměry této šrafované zóny se vždy určují pomocí TED. Zbylá plocha ležící mimo tuto vyznačenou oblast dané toleranci nepodléhá [3; 8].

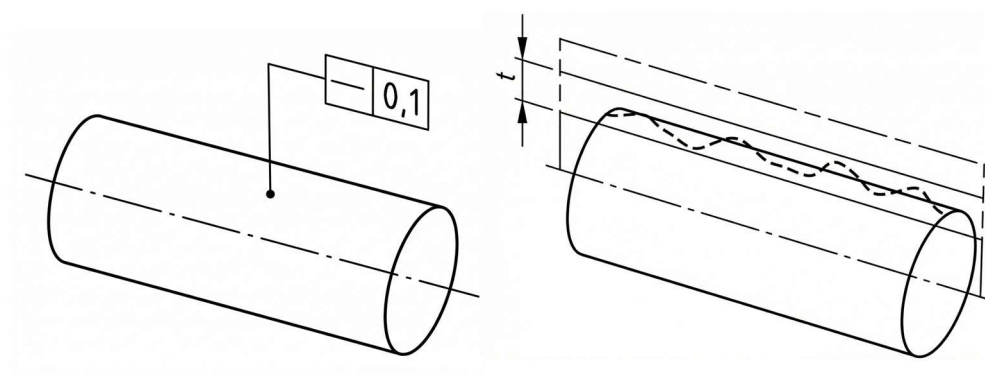


Obr. 3-11 Indikace omezené plochy [8]

3.3.7 Tolerance tvaru

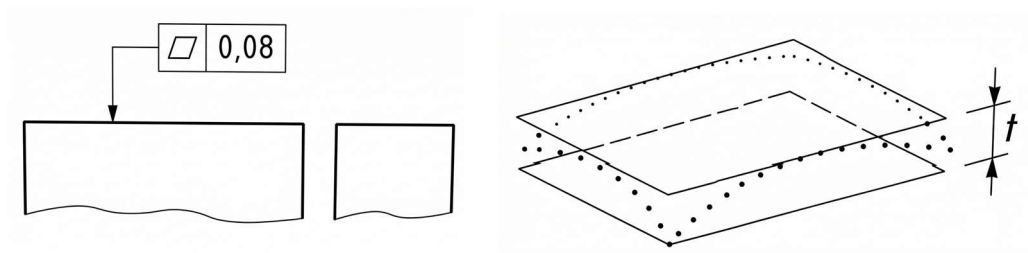
Geometrické tolerance tvaru definují maximální přípustné úchytky tvaru pro samostatné integrální prvky. Charakteristickým rysem těchto tolerancí v rámci systému geometrických specifikací výrobků je skutečnost, že specifikovaná toleranční pole není nijak vázána k žádné základně či soustavě základů. Geometrický prvek získaný extrakcí ze skutečného povrchu součásti (extrahovaný prvek) se musí beze zbytku nacházet uvnitř tohoto předepsaného tolerančního pole. Dle normy ČSN EN ISO 1101 se definují následující tolerance tvaru: [4; 8]

Přímost – Toleranční pole pro uvažovaný extrahovaný prvek, například osu součásti nebo tvořící přímku na jejím povrchu, je v závislosti na požadavku výkresu vymezeno buď plochou mezi dvěma rovnoběžnými přímkami ležícími ve stanovené rovině vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance t , nebo válcovým prostorem o průměru t . Extrahovaná čára integrálního prvku nesmí tyto hranice překročit [4; 8].



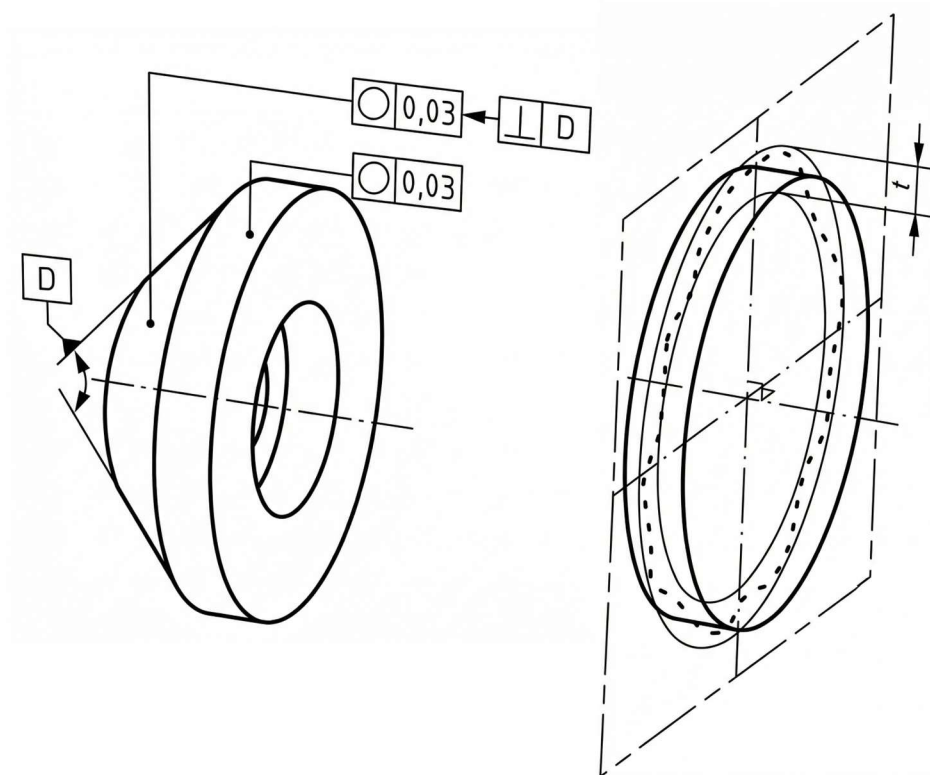
Obr. 3-12 Indikace přímosti ve 3D a její toleranční pole [8]

Rovinnost – Toleranční pole je v prostoru vymezeno dvěma přesně rovnoběžnými rovinami, jejichž kolmá vzdálenost je rovna předepsané hodnotě tolerance t . Celý uvažovaný extrahovaný povrch musí ležet uvnitř tohoto ohraničení [4; 8].



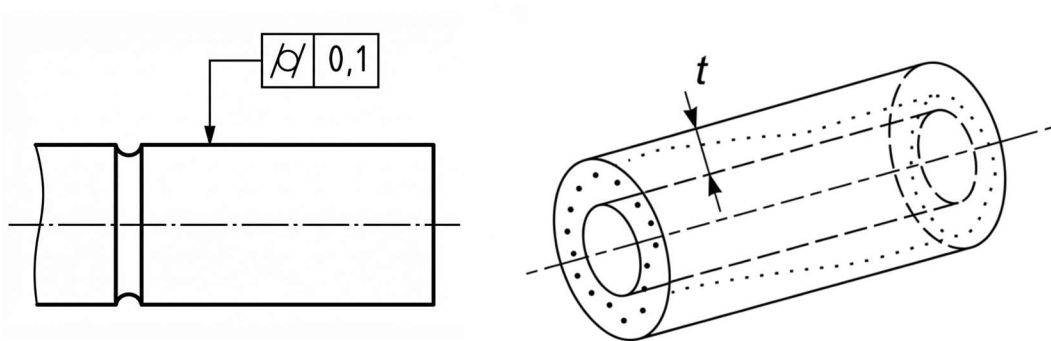
Obr. 3-13 Indikace rovinnosti a její toleranční pole [8]

Kruhovitost – Omezuje úchytky tvaru v definovaných řezech. Toleranční pole je v každém jednotlivém příčném průřezu, kolmém na teoretickou osu uvažovaného prvku, vymezeno dvěma soustřednými kružnicemi. Radiální vzdálenost těchto kružnic (rozdíl jejich poloměrů) je rovna hodnotě tolerance t . Extrahovaná čára obvodu průřezu musí ležet v tolerančním poli [4; 8].



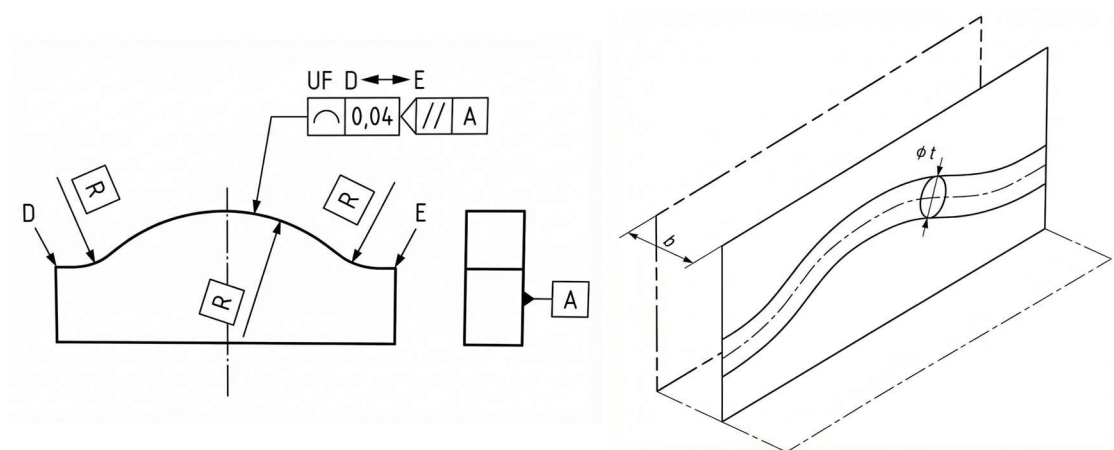
Obr. 3-14 Indikace kruhovitosti ve 3D se směrovým prvkem kolmým na osu součásti a její toleranční pole [8]

Válcovitost – Představuje plně prostorovou kontrolu rotační plochy. Toleranční pole je ohraničeno dvěma souosými válci, jejichž radiální vzdálenost je rovna hodnotě tolerance t . Extrahovaný integrální válcový prvek musí zcela ležet v prostoru mezi těmito dvěma válci. Tato tolerance tak komplexně omezuje nejen úchytky kruhovitosti, ale i přímosti a rovnoběžnosti tvořících přímek válce [4; 8].



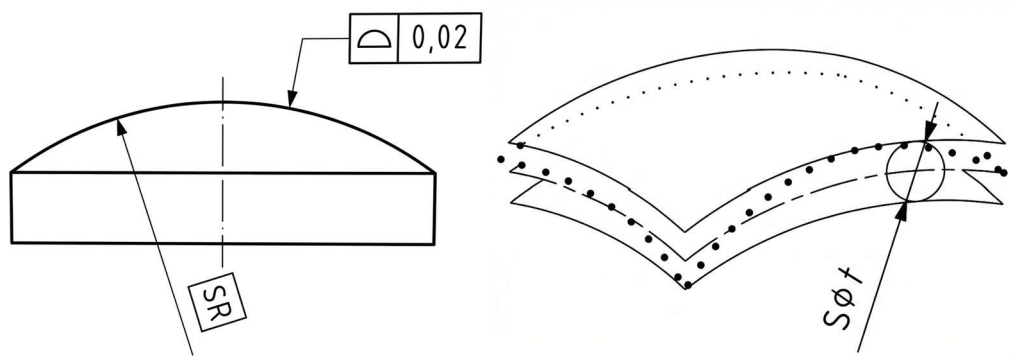
Obr. 3-15 Indikace válcovitosti a její toleranční pole [8]

Tvar profilu čáry – Není-li u této specifikace předepsána základna, omezuje výhradně tvarovou úchylku posuzovaného profilu. Toleranční pole je definováno jako prostor mezi dvěma ekvidistantními (obalovými) čarami, které obalují množinu kružnic o průměru t , jejichž středy leží na teoreticky přesném geometrickém profilu čáry [4; 8].



Obr. 3-16 Indikace profilu čáry a její toleranční pole. (b je libovolný rozměr) [8]

Tvar profilu plochy – Není-li specifikována základna, definuje úchylku prostorového tvaru. Toleranční pole je vymezeno dvěma ekvidistantními (obalovými) plochami, které v prostoru obalují množinu koulí o průměru t , jejichž středy se nacházejí na teoreticky přesném geometrickém tvaru plochy [4; 8].

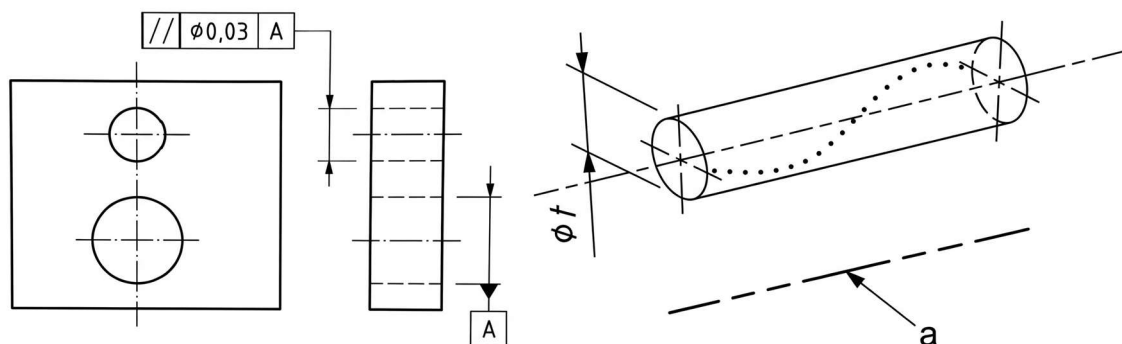


Obr. 3-17 Indikace profilu plochy a její toleranční pole [8]

3.3.8 Tolerance orientace

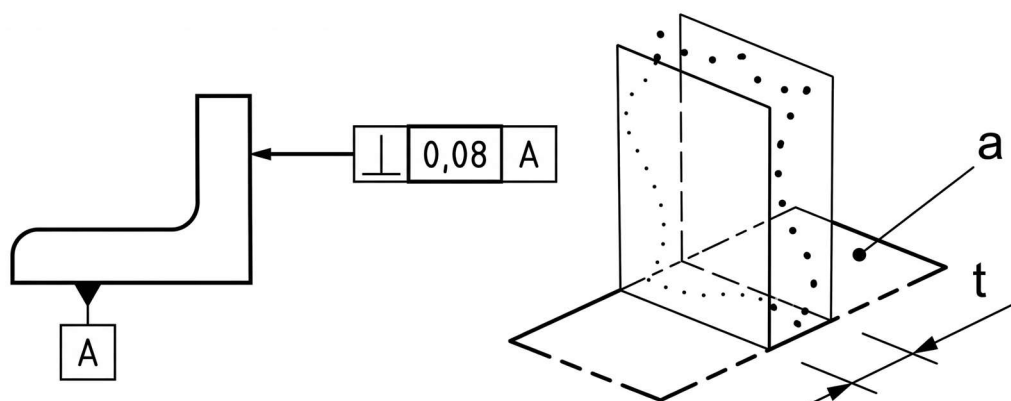
Geometrické tolerance orientace slouží ke kontrole a omezení úchylek natočení uvažovaného prvku vůči předepsanému referenčnímu prvku. Charakteristickým rysem a nutnou podmínkou těchto tolerancí je, že vyžadují předpis alespoň jedné základny nebo soustavy základen v indikátoru geometrické tolerance [4]. Tolerancemi orientace jsou omezeny výhradně rotační stupně volnosti. Toleranční pole orientace nedefinuje umístění prvku, jelikož ponechává posuvné stupně volnosti zcela neomezené. Tyto tolerance se aplikují buď přímo na samotný povrch tolerovaného integrálního prvku, nebo na prvek odvozený například osu či rovinu souměrnosti. Dle normy ČSN EN ISO 1101 se definují následující tolerance orientace [4; 5; 8]:

Rovnoběžnost – Omezuje úchylky orientace pro prvky, u kterých je vyžadován teoreticky přesný úhel 0° k referenční základně. Pokud je posuzován plošný prvek, je toleranční pole vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu t , které jsou dokonale rovnoběžné s předepsanou základnou. V případě tolerování odvozeného prvku (osy) při uvedení symbolu průměru tvoří pole válec o průměru t , jehož teoretická osa je rovněž rovnoběžná se základnou. Uvažovaný extrahovaný prvek se musí beze zbytku nacházet uvnitř tolerančního pole [8].



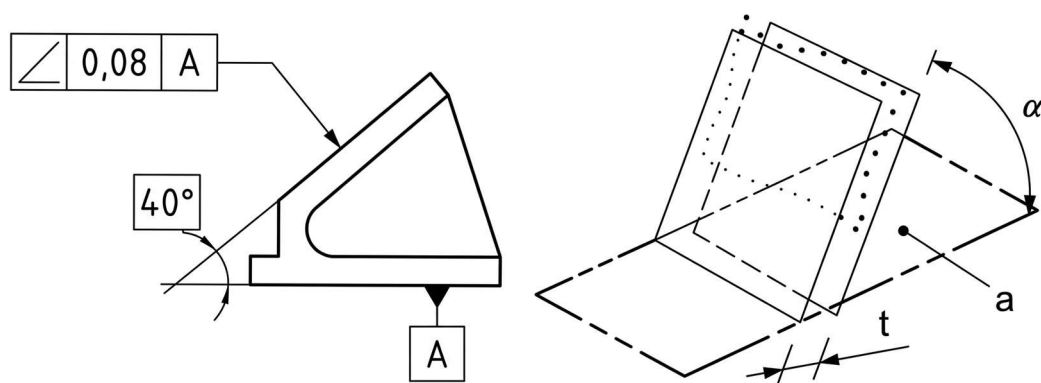
Obr. 3-18 Indikace rovnoběžnosti a její toleranční pole [8]

Kolmost – Slouží ke kontrole prvků, jejichž jmenovitá orientace vůči stanovené základně činí přesně 90° . Pro plochy je toleranční pole ohraničeno dvěma rovnoběžnými rovinami s roztečí rovnou toleranci t , přičemž obě tyto roviny jsou striktně kolmé k určené základně. Týká-li se předpis osy se symbolem průměru v indikátoru, je prostor tolerance definován válcem o průměru t , který je kolmý na danou základnu. Celý uvažovaný extrahovaný prvek nesmí tyto hranice překročit [8].



Obr. 3-19 Indikace kolmosti a její toleranční pole [8]

Sklon – Definuje povolené úchytky natočení pro prvky orientované v jakémkoliv jiném jmenovitém úhlu, tedy odlišném od 0° a 90° . Toleranční pole pro rovinné povrchy zde tvoří dvě rovnoběžné roviny ohraničující prostor o šířce t , které s předepsanou základnou svírají požadovaný teoreticky přesný úhel. Toleruje-li se osa se symbolem průměru, představuje toleranční pole válec o průměru t orientovaný ve stanoveném teoreticky přesném úhlu od základny. Extrahovaný prvek musí beze zbytku ležet uvnitř takto definovaného pole [8].

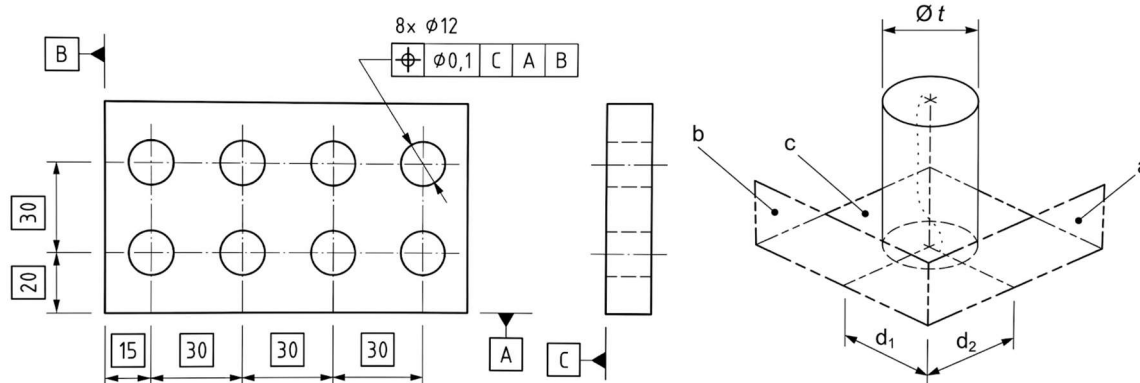


Obr. 3-20 Indikace sklonu a její toleranční pole [8]

3.3.9 Tolerance umístění

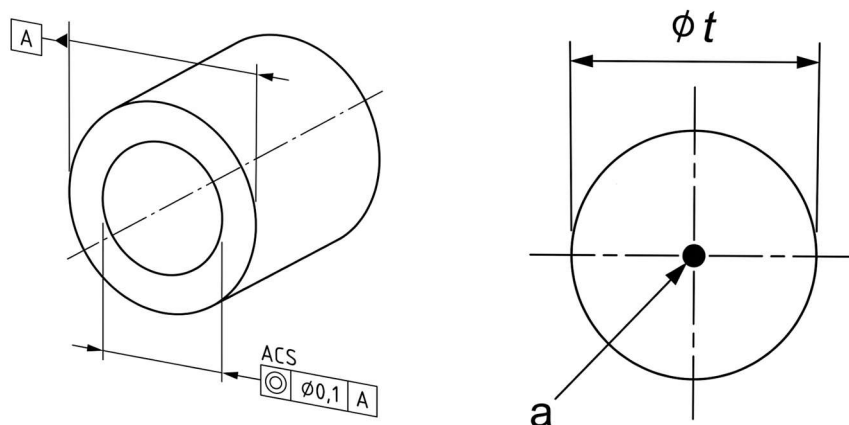
Geometrické tolerance umístění definují a omezují přesnou polohu uvažovaného prvku vůči jinému prvku identifikovanému jako základna. V souladu s principem nezávislosti podle normy ISO 8015 se tyto tolerance předepisují vždy na jeden konkrétní prvek. Zpravidla se aplikují na prvek odvozený z daného povrchu, což výkresová dokumentace indikuje návazností odkazové čáry tolerance přímo na kótovací čáru příslušného rozměru. Výjimku z těchto pravidel představuje tolerance polohy. Tu lze jako jedinou aplikovat přímo na samotný povrch tolerovaného prvku. Zároveň může být tolerance polohy použita i zcela bez předepsané základny, a to u soustav či vzorů prvků, kde je funkčně rozhodující pouze jejich vzájemná poloha. Dle normy ČSN EN ISO 1101 se definují následující tolerance umístění [5; 8]:

Poloha – Definuje povolené úchytky umístění pro jmenovité nebo odvozené prvky, jako jsou středové body, osy, rovinné plochy či střední roviny. Toleranční pole nabývá v závislosti na typu uvažovaného prvku a předepsaném symbolu tvaru prostoru mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, válce nebo koule. Přesné umístění a případná orientace tohoto tolerančního pole vůči stanoveným základnám je definována pomocí teoreticky přesných rozměrů (TED). Skutečný vyextrahovaný prvek se musí celým svým rozsahem nacházet uvnitř takto vymezených hranic [4; 5; 8]



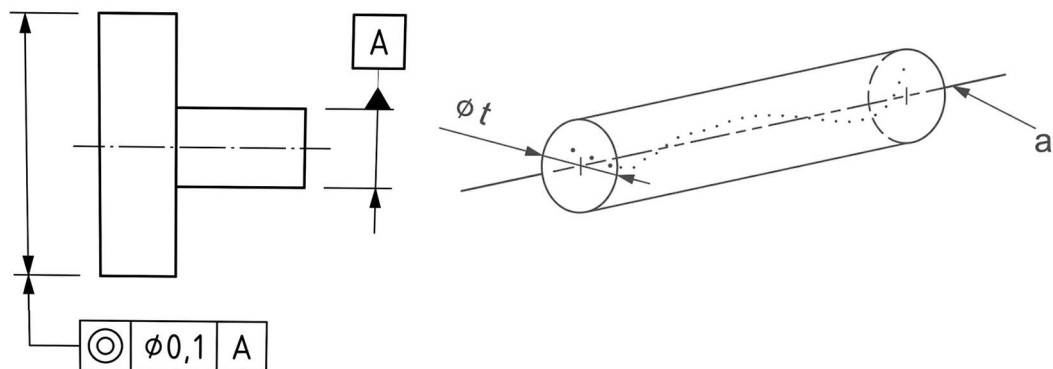
Obr. 3-21 Indikace polohy a její toleranční pole [8]

Soustřednost – Omezuje úchytky umístění pro odvozené středové body v jednotlivých příčných řezech součásti. Pro indikaci tohoto požadavku na konkrétní řez se dle normy využívá symbol ACS. Toleranční pole v daném průřezu tvoří kružnice o průměru rovném předepsané toleranci, jejíž střed leží přesně v referenčním bodě stanovené základny. Každý vyextrahovaný střed posuzovaného prvku musí ležet beze zbytku uvnitř tohoto kruhového pole [4; 5; 8].



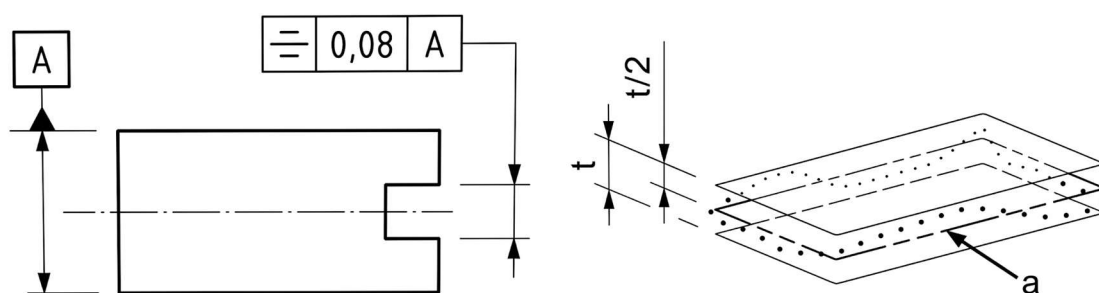
Obr. 3-22 Indikace soustřednosti a její toleranční pole [8]

Souosost – Slouží ke komplexní kontrole umístění odvozených středních os válcových prvků v trojrozměrném prostoru. Toleranční pole je vždy vymezeno válcovým prostorem o průměru odpovídajícím hodnotě tolerance, přičemž jeho teoretická osa je dokonale totožná s osou předepsané referenční základny. Celá vyextrahovaná střední čára (osa) nesmí z tohoto vymezeného válcového prostoru nikde vystoupit [5; 8].



Obr. 3-23 Indikace souososti a její toleranční pole [8]

Souměrnost – Kontroluje úchyly umístění odvozených prvků, jimiž jsou ve strojírenské praxi typicky střední plochy drážek nebo čepů. Toleranční pole je vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu předepsané tolerance. Tyto dvě hraniční roviny jsou v prostoru rozloženy symetricky okolo střední roviny definované příslušnou základnou. Vyextrahovaná skutečná střední plocha tolerovaného prvku se musí beze zbytku nacházet v prostoru mezi těmito rovinami [4; 5; 8].

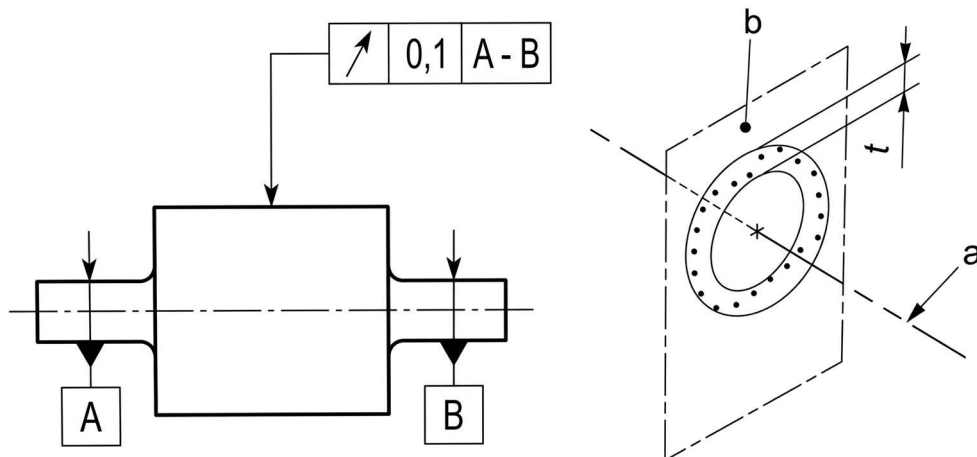


Obr. 3-24 Indikace souměrnosti a její toleranční pole [8]

3.3.10 Tolerance házení

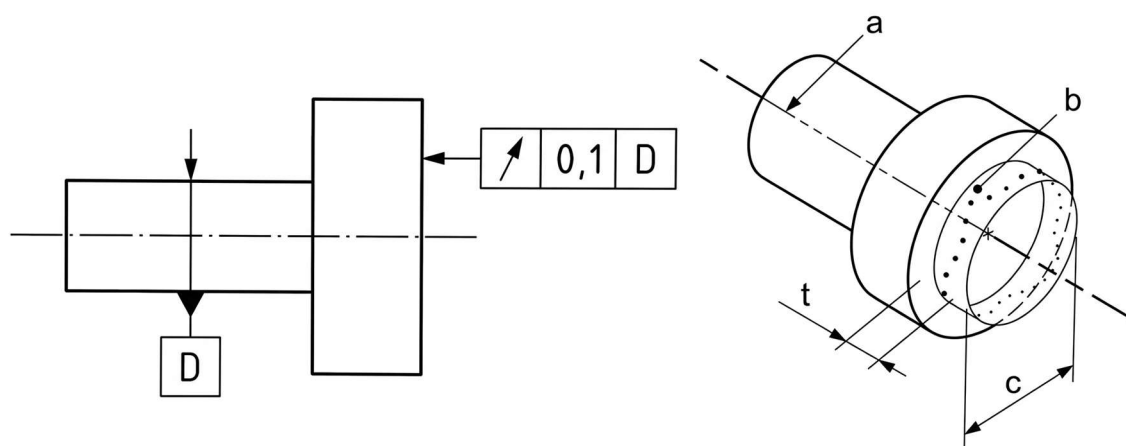
Geometrické tolerance házení se aplikují přímo na samotný povrch tolerovaného prvku. V souladu s principem nezávislosti podle normy ISO 8015 se tyto tolerance předepisují vždy na jeden konkrétní prvek, přičemž nezbytnou podmínkou pro jejich vyhodnocení je předpis základny. Házení omezuje nejen úchylku tvaru posuzované plochy, ale současně řídí i polohu jejích jednotlivých bodů vůči předepsané základně či skupině základen. Z geometrického hlediska tak házení v sobě funkčně zahrnuje i tolerance souososti, válcovitosti a kolmosti. V technické praxi se tyto specifikace předepisují primárně pro rotační součásti citlivé na nesouosost, jakými jsou typicky hřídele osazené ložisky nebo ozubenými koly. Dle normy ČSN EN ISO 1101 se tato kategorie rozděluje na dvě základní charakteristiky, a to na házení kruhové a házení celkové [4; 5; 8].

Kruhové obvodové házení – Slouží ke kontrole rotačních ploch, přičemž omezuje radiální úchylky libovolného kruhového průřezu zcela nezávisle na ostatních průřezech. Toleranční pole je v každé rovině řezu kolmé na teoretickou osu rotace vymezeno dvěma soustřednými kružnicemi. Středů těchto ohraničujících kružnic leží na předepsané referenční základně a jejich vzájemná radiální vzdálenost je rovna hodnotě předepsané tolerance t . Extrahovaná obvodová čára skutečného povrchu nesmí během jedné úplné otáčky součásti kolem základní osy tuto vymezenou oblast opustit [5; 8]



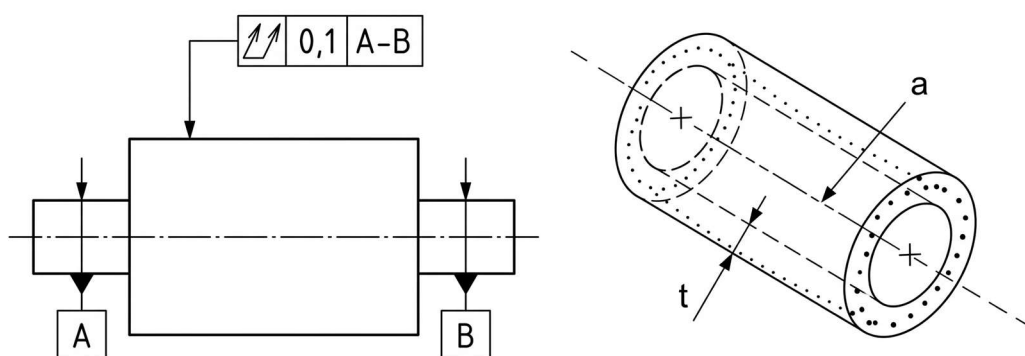
Obr. 3-25 Indikace kruhového obvodového házení a její toleranční pole [8]

Kruhové čelní házení – Slouží ke kontrole na rovinné povrchy orientované kolmo k ose rotace, kde omezuje axiální úchyly a současně kontroluje kolmost či případné vibrace během otáčení prvku vzhledem k základně. Toleranční pole je na jakémkoliv posuzovaném průměru definována dvěma kružnicemi ležícími na myšleném válci, který je dokonale souosý se stanovenou základnou. Vzájemná axiální rozteč těchto dvou kružnic odpovídá hodnotě tolerance t . Extrahovaná čára posuzovaného čelního povrchu se musí během jedné otáčky součásti nacházet beze zbytku uvnitř tohoto prostoru [5; 8]



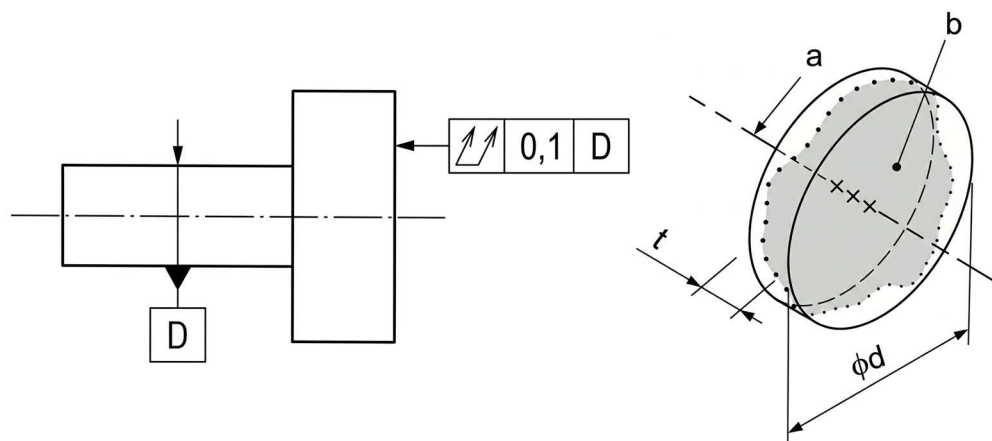
Obr. 3-26 Indikace kruhového čelního házení a její toleranční pole [8]

Celkové obvodové házení – Představuje komplexní kontrolu celého válcového povrchu rotačního prvku, na rozdíl od kruhového házení posuzujícího pouze jednotlivé řezy. Toleranční pole je v trojrozměrném prostoru ohraničeno dvěma souosými válci. Společná teoretická osa těchto hraničních válců je plně totožná s předepsanou referenční základnou a jejich vzájemná radiální vzdálenost odpovídá hodnotě tolerance t . Během plynulého otáčení součásti kolem základní osy nesmí žádný bod celého vyextrahovaného povrchu tuto definovaný prostor překročit [5; 8]



Obr. 3-27 Indikace celkového obvodového házení a její toleranční pole [8]

Celkové čelní házení – Aplikuje se plošně na celou uvažovanou čelní plochu součásti, přičemž vedle axiálních úchylek plně kontroluje i rovinnost a celkovou kolmost povrchu vzhledem k ose rotace. Toleranční pole je v prostoru vymezeno dvěma přesně rovnoběžnými rovinami. Tyto ohraničující roviny jsou orientovány striktně kolmo k předepsané základně a jejich vzájemná axiální rozteč je rovna toleranci t . Celý vyextrahovaný čelní povrch se musí beze zbytku nacházet uvnitř vymezeného prostoru po celou dobu rotace součásti kolem uvažované základní osy [5; 8]



Obr. 3-28 Indikace celkového čelního házení a její toleranční pole [8]

3.4 Závislé tolerance

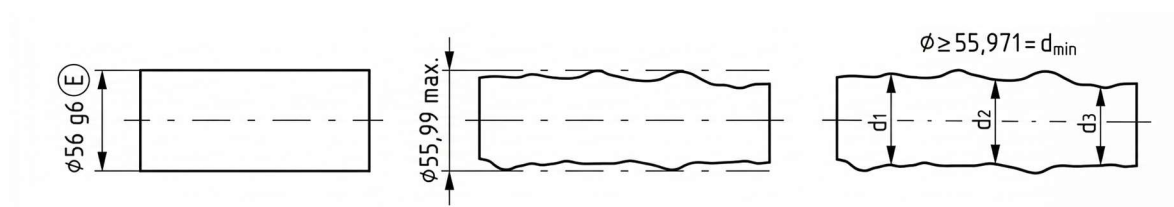
Jak již bylo dříve zmíněno, základním pilířem tolerování je pravidlo nezávislosti definované normou ISO 8015, podle kterého se jednotlivé délkové, úhlové i geometrické tolerance posuzují a vyhodnocují zcela samostatně a nezávisle na sobě. V řadě případů strojírenské praxe je však z funkčního hlediska výhodnější obě kategorie propojit. K zajištění správné funkce a zaměnitelnosti součástí, obzvláště těch v uložení. Proto se využívají takzvané závislé tolerance. Systém definovaný převážně v normě ISO 2692 umožňuje vytvořit přímou závislost mezi skutečným rozměrem prvku a jeho příslušnou geometrickou tolerancí [3; 5; 10].

Aplikace závislých tolerancí se na výkresové dokumentaci provádí prostřednictvím specifických značek, takzvaných modifikátorů $\textcircled{E}$ $\textcircled{M}$ $\textcircled{L}$ $\textcircled{R}$.

3.4.1 Požadavek obalové plochy ㊦

Primárně se aplikuje na plochy součástí, které při montáži tvoří uložení. Aplikací tohoto modifikátoru se definuje přímá závislost mezi tolerancí rozměru prvku a jeho tolerancí tvaru. Základním principem je, že skutečný povrch tolerovaného prvku nesmí překročit obalovou plochu dokonalého geometrického tvaru. Předpisem tohoto požadavku je tak automaticky zaručena určitá tvarová přesnost, a samostatná tolerance tvaru se proto předepisuje pouze tehdy, musí-li být přísnější než tolerance rozměru [3].

U prvku charakteru hřídele se rozměr na maximum materiálu (horní mezní rozměr) kontroluje pomocí opsané obalové plochy přesného geometrického tvaru, kterou nesmí skutečný povrch překročit, zatímco dolní mezní rozměr se zjišťuje dvoubodově. V případě prvku charakteru díry je naopak obalová plocha přesného tvaru vepsána na mezi maxima materiálu (dolní mezní rozměr) a horní mezní rozměr se následně kontroluje standardním dvoubodovým měřením [3].

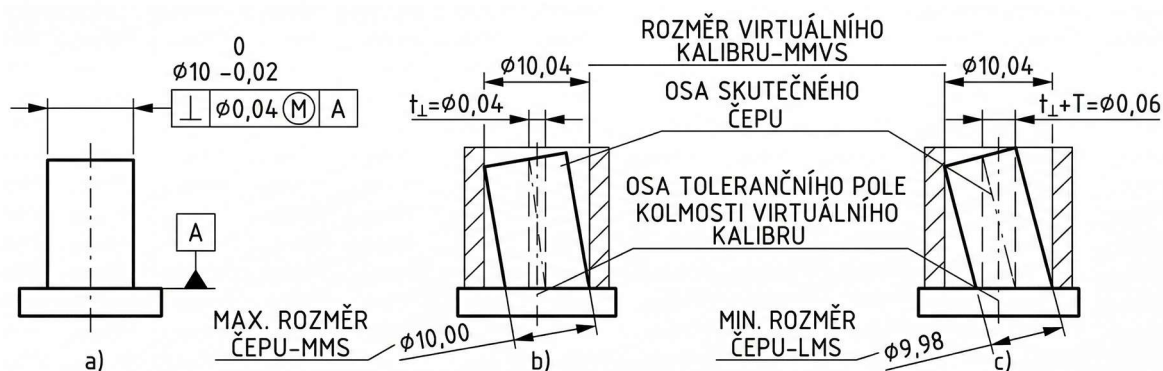


Obr. 3-29 Požadavek obalové plochy na hřídeli [3]

3.4.2 Požadavek maxima materiálu ㊦

Hlavním účelem je zajištění sestavitelnosti dvou protikusů, například hřídele a díry. Podstata požadavku spočívá v tom, že definovaná geometrická tolerance platí pouze v případě, když je prvek vyroben ve stavu maxima materiálu. Pokud se skutečný rozměr prvku od tohoto stavu vzdaluje, tedy u hřídele se průměr zmenšuje a u díry zvětšuje, dochází k automatickému navýšení původní geometrické tolerance o tento rozměrový rozdíl, čímž vzniká tzv. bonusová tolerance [4].

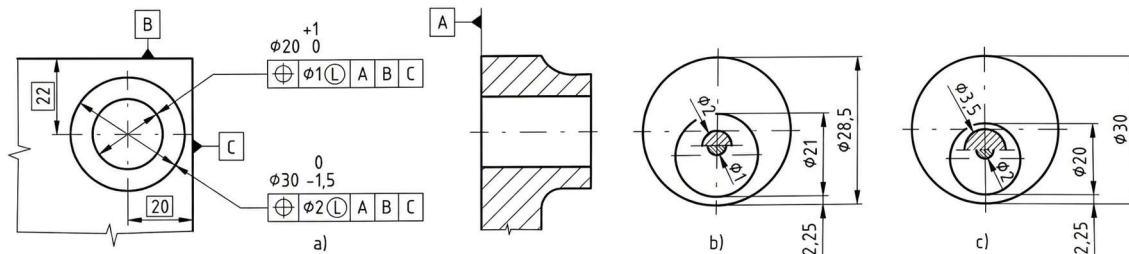
Tento přístup umožňuje uznat za vyhovující i ty součásti, které by při nezávislém posuzování geometrie a rozměru byly vyřazeny, přestože jejich funkční vlastnost zůstává zachována [10] Samotné ověřování se v praxi provádí na 3D souřadnicových strojích nebo pomocí pevných mezních kalibrů, jež spolehlivě simulují protikus a reálnou montážní situaci [3].



Obr. 3-30 Tolerance kolmosti s požadavkem maxima materiálu [3]

3.4.3 Požadavek minima materiálu $\textcircled{L}$

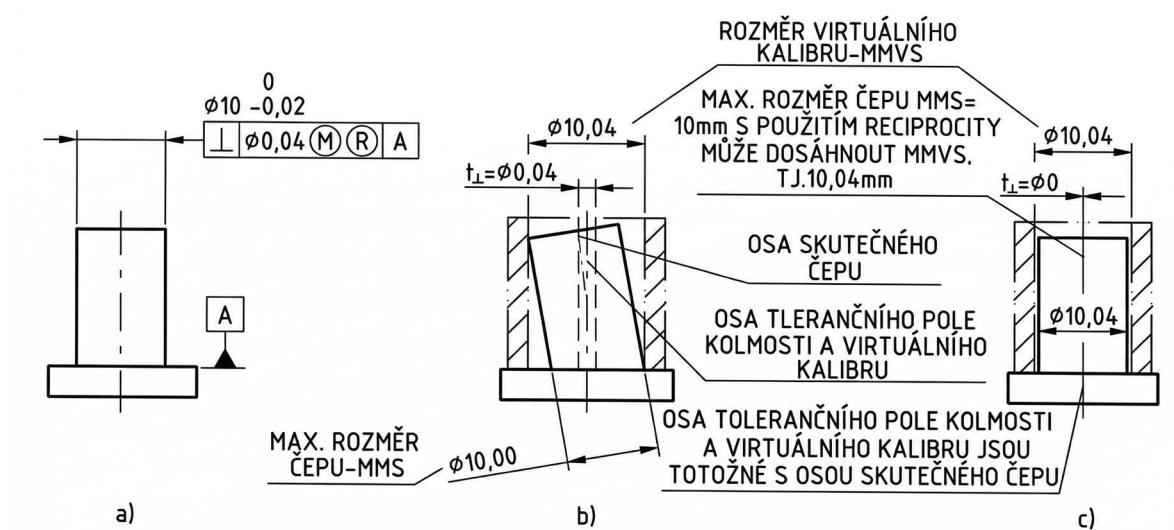
Využívá se v případech, kdy je kritickým funkčním požadavkem zachování minimální tloušťky stěny nebo pevnosti součásti. Na rozdíl od požadavku maxima materiálu zde dochází k nárůstu geometrické tolerance v okamžiku, kdy se skutečný rozměr prvku vzdaluje od stavu minima materiálu směrem k většímu objemu materiálu. Aplikace požadavku minima materiálu tak umožňuje garantovat, že i při maximální dovolené geometrické úchylce nedojde k překročení kritického průřezu materiálu, což je klíčové zejména u odlitků, výlisků nebo u součástí namáhaných na tlak a tah [3; 6; 10].



Obr. 3-31 aplikace požadavku minima materiálu; Nálitek a díra vyroben b) na rozměr minima materiálu c) na rozměr maxima materiálu [3]

3.4.4 Požadavek reciprocity ®

Představuje rozšíření požadavku maxima nebo minima materiálu. Zatímco standardní aplikace maxima materiálu umožňuje navýšení geometrické tolerance na základě skutečného rozměru prvku, požadavek reciprocity zavádí obousměrnou závislost. Umožňuje totiž překročit stanovený mezní rozměr maxima či minima materiálu o hodnotu, o kterou je skutečná geometrická úchylka menší než definovaná tolerance. V praxi to znamená, že pokud je prvek vyroben s vysokou geometrickou přesností, je možné připustit nárůst materiálu u hřídele nebo jeho pokles u díry mimo původně stanovené rozměrové meze, aniž by byla narušena funkční sestavitelnost s protikusem [3; 6; 10].



Obr. 3-32 Tolerance kolmosti s požadavkem reciprocity u maxima materiálu [3]

3.5 Metody měření a analýza výrobní přesnosti

Spolehlivé ověření shody skutečného výrobku s požadavky výkresové dokumentace vyžaduje volbu adekvátní měřicí metodiky a přístrojového vybavení. V současné průmyslové praxi se pro kontrolu rozměrových a geometrických tolerancí využívá široké spektrum technik, od konvenčních dílenských měřidel až po vysoce přesné souřadnicové systémy.

3.5.1 Konvenční dílenská měřidla

Konvenční dílenská měřidla spadají do kategorie mechanických měřidel a pracují převážně na principu přímé metody měření, při které se hledaná délková veličina zjišťuje přímým odečítáním na samotném měřidle. Představují naprostý základ metrologického vybavení v každém strojírenském provozu.

Posuvná měřidla – jsou nejpoužívanějším zástupcem v této kategorii a slouží k velmi operativnímu měření vnějších a vnitřních rozměrů, délek, hloubek a osazení. Klasická posuvná měřidla jsou vybavena základní stupnicí a jemnou noniovou stupnicí s běžnou rozlišitelností 0,05 mm a 0,02 mm. Pro zjednodušení práce se využívají kombinovaná měřidla s kruhovým číselníkem, nebo v současnosti velmi rozšířená digitální posuvná měřidla, která poskytují rozlišitelnost 0,01 mm [11; 12].

Mikrometrická měřidla – Jsou o 1 řád přesnější než posuvná měřidla. Využívají se pro měření prvků s vyššími nároky na celkovou přesnost. Základem těchto přístrojů je přesně broušený mikrometrický šroub ukotvený ve válcovém tělese, přičemž měřidlo je standardně vybaveno mechanismem, který zabezpečuje konstantní sílu přitlaku měřicího doteku k objektu. Měřicí rozsah jednotlivých mikrometrů bývá z konstrukčních a praktických důvodů menší než u posuvných měřidel. Pro měření vnitřních rozměrů se aplikují vnitřní mikrometry dvoudotekové, nebo snazší na vystředění válcových otvorů třídotekové. Rozlišitelnost běžných mikrometrů s klasickým analogovým odečítáním činí 0,01 mm, zatímco digitální varianty dosahují rozlišitelnosti až 0,001 mm [11; 12].

Hloubkoměry a výškoměry – Hloubkoměry konstrukčně vycházejí z posuvných měřidel nebo z mikrometrů a slouží k měření hloubky děr, dutin a zápichů. Výškoměry se naopak využívají k měření výšek a osazení, přičemž jsou typicky vertikálně upevněné na základovou desku, od jejíž spodní plochy se odvozují veškeré naměřené rozměry. Rozlišitelnost obou typů přístrojů se u klasických provedení pohybuje v rozmezí 0,05 mm až 0,01 mm, zatímco vyspělejší digitální a mikrometrické varianty dosahují rozlišitelnosti až 0,001 mm [11].

3.5.2 Pevné mezní kalibry

Pevné mezní kalibry nacházejí své nezastupitelné uplatnění především v sériové výrobě. Tato měřidla neudávají konkrétní číselnou velikost rozměru ani jeho přesnou úchylku od jmenovité hodnoty. Jejich hlavním účelem je rychlé a jednoznačné rozdělení kontrolovaných výrobků na kusy dobré, na zmetky, které lze ještě opravit, a na zmetky neopravitelné. Samotný proces měření je nejen velmi spolehlivý ale i velmi rychlý [12].

V technické praxi se pro kontrolu rozměrů využívají primárně kalibry, které jsou vybaveny dvěma stranami – dobrou a zmetkovou. Součástí je vyhodnocení jako rozměrově vyhovující pouze v případě, kdy dobrá strana kalibru kontrolovaným prvkem projde a zmetková strana nikoliv [12].

Dobrá strana – reprezentuje rozměr odpovídající maximálnímu množství materiálu součásti, což u díry představuje dolní mezní rozměr (DMR) a u hřídele horní mezní rozměr (HMR). Neprojde-li dobrá strana kalibru přes kontrolovaný prvek, znamená to, že v součásti zůstalo nadbytečné množství materiálu a jedná se o opravitelný zmetek [12].

Zmetková strana – reprezentuje rozměr odpovídající minimu materiálu součásti, tedy horní mezní rozměr (HMR) u díry a dolní mezní rozměr (DMR) u hřídele. Pokud tato strana kontrolovaným prvkem projde, byl překročen povolený úběr materiálu a součást se stává neopravitelným zmetkem. Zmetková strana je označena červeným proužkem a samotná měřicí plocha je kratší [12].

Z hlediska konstrukčního provedení se měřidla dělí podle kontrolovaného prvku na válečkové kalibry, které slouží ke kontrole vnitřních rozměrů a třmenové kalibry se využívají ke kontrole vnějších rozměrů [11].

3.5.3 Přístroje pro měření geometrických tolerancí

Příměrné desky – slouží v metrologické praxi jako základní referenční rovina neboli základna. Tyto desky se vyrábějí z vysoce odolných vyvřelých hornin (např. žula, diabas či gabro), které se souhrnně označuje pojmem „granit“. Granit vyniká výbornou tvarovou stabilitou, odolností proti opotřebení, a navíc nepoškozuje ocelové povrchy. Zásadní podmínkou je jemnozrnná a celistvá struktura kamene zcela bez trhlin a měkkých vměstků, přičemž jeho barva musí být na celé desce vždy jednotná [13].

Prismata (V drážka) – jsou ustavovací pomůcky určené primárně pro práci s rotačními součástmi. Slouží k přesnému ustavení referenční osy neboli základny kontrolovaného dílu. Standardně se jedná o ocelové bloky, které mají vybroušenou podélnou drážku s vrcholovým úhlem nejčastěji 90°. Uložení součásti do těchto drážek zajišťuje nejen její přesné polohové ustavení, ale zároveň umožňuje plynulé otáčení dílu kolem jeho vlastní osy, což je nezbytný předpoklad pro následné zjišťování geometrických odchylek rotačních ploch [14].

Koncové měrky – představují zhmotněné míry, které primárně neslouží jako běžná pracovní měřidla, ale fungují jako etalony délky. Konstrukčně se jedná o tělesa ve tvaru pravouhlého hranolu s přesně broušených a lapovaných, navzájem rovnoběžných měřicích ploch. Nejčastěji se vyrábějí z legovaných nástrojových ocelí slinutých karbidů nebo keramiky [12]. Do praxe se dodávají nejčastěji v celých sadách, které umožňují metodou nasávání sestavit libovolný požadovaný rozměr [11]. Přičemž kombinace jednotlivých měrek by měla obsahovat co nejmenší počet měrek [11; 12; 15].

Sinusové pravítko – je přesný měřicí přístroj určený pro nepřímé měření úhlů a kontrolu geometrické tolerance sklonu. Jeho konstrukce a princip nastavení vycházejí z goniometrické funkce sinus. Jeden ze dvou opěrných válečků pravítka s definovanou roztečí L se na příměrné desce podloží sestavou koncových měrek o výšce H . Tím se pracovní plocha pravítka nakloní do úhlu α , pro který platí vztah $\sin(\alpha) = \frac{H}{L}$. Výsledná odchylka úhlu kontrolované součásti se následně zjišťuje pomocí úchylkoměru [11; 12].

Úchylkoměry – představují skupinu měřidel, která se primárně využívá k měření úchylek rozměrů. Uplatňují se při měření na průměrných deskách a při kontrole tvarů rovinných i rotačních ploch. V klasickém mechanickém provedení jsou tyto přístroje vybaveny stavitelným číselníkem, přičemž jejich běžná rozlišitelnost se pohybuje v rozmezí od 0,01 mm nebo 0,001 mm a celkový měřicí rozsah činí 1 mm až 10 mm [15].

Specifickou variantou jsou páčkové úchylkoměry. Jejich hlavní výhodou je zalomený tvar doteku, který umožňuje měření i na standardně nepřístupných místech jakými jsou například vnitřní plochy děr. Oproti klasickým úchylkoměrům mají zhruba desetkrát menší měřicí sílu, což dovoluje přesnou kontrolu elastických či tenkostěnných dílů. Při práci s páčkovým úchylkoměrem je však nezbytné dbát na úhel α mezi osou páčky a měřenou plochou. Svírali s měřenou plochou určitý úhel, vzniká chyba a naměřenou hodnotu je třeba korigovat vynásobením funkcí kosinus příslušného úhlu sklonu $\cos(\alpha)$ [15].

3.5.4 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (Coordinate Measuring Machines – CMM) umožňují velmi přesné měření i tvarově vysoce komplexních součástí, přičemž zjišťují prostorové souřadnice x , y , z jednotlivých bodů na povrchu měřeného objektu. Z těchto naměřených souřadnic pak připojené softwarové vyhodnocovací zařízení matematicky vypočítá skutečnou geometrii objektu, vzdálenosti, úhly či geometrické tolerance [11].

Při měření na 3D souřadnicovém stroji je měřený díl upnut na pevném granitovém stole. Pohyb měřicí hlavy v pravoúhlém souřadnicovém systému je zajišťován buď manuálně, nebo pomocí servopohonů. Samotné snímání bodů na součásti může probíhat dotykovým a bezdotykovým měřením [11].

Dotykové měření – měřicí hlava se fyzicky dotýká povrchu součásti prostřednictvím doteku, který je standardně zakončen přesnou rubínovou kuličkou [11].

Bezdotykové měření – systém vysílá dva laserové paprsky, které se protínají v přesně definované vzdálenosti, a jakmile povrch měřené součásti vstoupí do tohoto průsečíku, vyhodnocovací jednotka stroje danou souřadnici okamžitě zaregistruje. Moderní třísouřadnicové stroje dosahují při tomto způsobu měření rozlišitelnosti až 0,0001 mm [11].

3.5.5 Optické 3D skenery

Alternativou k tradičním dotykovým souřadnicovým strojům jsou optické 3D skenery, které představují vysoce efektivní metodu pro bezkontaktní digitalizaci a kontrolu tvarově složitých součástí. Na rozdíl od dotykových systémů, které snímají povrch bod po bodu, dokážou optické skenery zachytit celou plochu objektu najednou a vygenerovat miliony prostorových souřadnic během několika sekund. Výsledkem skenování je hustá síť bodů, kterou lze následně softwarově vyhodnocovat nebo porovnávat s nominálním CAD modelem [16].

Princip těchto zařízení je nejčastěji založen na metodě projekce strukturovaného světla. Skener promítá na měřený povrch soustavu světelných pruhů, jejichž deformaci způsobenou zakřivením součásti následně snímají integrované kamery. Software poté pomocí optické triangulace vypočítá pro každý bod přesnou prostorovou souřadnici. Optické skenery nacházejí uplatnění především tam, kde by bylo dotykové měření neefektivní nebo zcela nemožné. Například při kontrole tvarově složitých součástí, měření snadno deformovatelných materiálů nebo při reverzním inženýrství [16].



Obr. 3-33 optický 3D skener GOM ATOS triple scan

3.6 Měřicí protokoly

Měřicí protokol je stěžejním metrologickým dokumentem, který slouží jako objektivní záznam o shodě skutečného provedení součásti s výkresovou dokumentací či 3D modelem. V průmyslové praxi plní funkci dokladu o kvalitě a je nezbytným podkladem pro uvolnění součásti do dalšího výrobního procesu nebo k finální expedici. Z hlediska způsobu vzniku a zpracování dat lze protokoly rozdělit do dvou hlavních skupin.

3.6.1 Protokoly pro konvenční měření

Při kontrole součástí pomocí konvenčních dílenských měřidel se standardně využívají tabulkové formuláře, často vytvářené v softwaru typu MS Excel. Získané hodnoty jsou do nich operátorem zadávány ručně. Měřicí protokol obsahuje tři hlavní části.

Modelový měřicí protokol byl poskytnut společností TES Vsetín, která se zabývá výrobou elektrických rotačních strojů. Konkrétně se jedná o protokol měření statorového paketu. Modelový měřicí protokol je doložen v přílohách.

Hlavička protokolu – Obsahuje základní data o proběhlém měření – název součásti, číslo výkresu, identifikaci zákazníka, jméno kontrolora, datum měření apod. Vyplnění dat je nezbytné pro zpětné sledování v případě reklamace a případně zabraňuje i nechtěné záměně protokolů.

Vydání BP
Zpracoval/Datum:

1 z 1

Pozice dle kontrolního plánu: Pos.in the Control plan/ Position im Kontrollplan		MĚŘICÍ PROTOKOL Measurement protokol / Messprotokol Inspekční certifikát / Certificate ČSN EN 10204-3.1		Zakázkové číslo: Contract No./Auftrags Nr.
Název projektu Name of Project/Projektname		Kus číslo: Pcs. No. / Stück Nr.	1, 2	Č.objednávky: Order No. / Bestellnummer
Kontrolní plán č.: Control plan Nr./Kontrollplan Nr.		Výkres TES: TES Drawing No. / TES Zeichnungs Nr.		Zákazník: Customer / Kunde
Výkres: Drawing No. / Zeichnungs Nr.		Název dílce: Part name / Benennung		

Obr. 3-34 Hlavička modelového protokolu

Tělo protokolu – Je formátováno do matice, kde každý řádek představuje jeden kontrolovaný rozměr či prvek. V levé části je specifikován nominální rozměr a jeho mezní úchytky. Následují sloupce vyhrazené pro zápis skutečně naměřených hodnot jednotlivých kusů v dané výrobní dávce. Tělo protokolu kombinuje různé metodiky kontroly. V tomto konkrétním případě je zaznamenáno měření tří rozměrových tolerancí, jedné geometrické tolerance a rovněž kontrolu pomocí mezního kalibru. Běžnou průmyslovou praxí je rovněž zařazení položek pro vizuální kontrolu např. vizuální zkouška celistvosti svarů, hodnocení drsnosti povrchu či kontrola absence otřepů.

Pos.	Jmenovitý rozměr Nominal value Nennmass	Tolerance Tolerances Abmasse	Naměřená hodnota / Actual Value / Istwert				
			Kus číslo / Pcs No. / Teil-Nr.				
			1	2			
1	L = 600	±1	600,1 ÷ 600,3	600,0 ÷ 600,3			
2	∅590	+0,044 -0,012	590,03 ÷ 590,02	590,00 ÷ 590,01			
3	∅420	±0,10	0,05 ÷ 0,07	0,05 ÷ 0,08			
4		1	0,15	0,20			
5	Check of slots with caliber		OK	OK			
6							
7							

Obr. 3-35 Tělo modelového protokolu

Závěrečné vyhodnocení – Obsahuje celkové rozhodnutí o shodě výrobku. Nachází se zde jmenovitá identifikace operátora, který měření fyzicky provedl, osoby, jež protokol zkontrolovala, a pracovníka odpovědného za finální uvolnění součásti. Opatření protokolu podpisem a razítkem je stěžejní z hlediska převzetí právní a kvalitativní odpovědnosti. Stvrzuje se tím, že součást je v pořádku a může být bezpečně uvolněna do další fáze výroby nebo přímo expedován.

Poznámka: Note / Anmerkung			
Klasifikace Result / Beschluss	☐ NEVYHOVUJE Not acceptable / Entspricht nicht	☒ VYHOVUJE Acceptable / Entspricht	Datum vystavení Issued on / Ausfertigungs-datum
Zkoušku provedl Tested by / Prufer	Podpis a razítko Signature / Unterschrift		
Schválil Approved by / Genehmigt			

Obr. 3-36 Vyhodnocení modelového protokolu

3.6.2 Protokoly pro souřadnicové měřicí stroje (CMM)

Software u souřadnicových měřicích strojů generuje protokoly automaticky bezprostředně po dokončení měření. Na rozdíl od ručně psaných tabulek je zde každý měřený rozměr či prvek popsán velmi detailně v řadě sloupců, které zajišťují maximální přehlednost a eliminují chyby zápisu.

Hlavička protokolu – Obsahuje základní data o proběhlém měření velmi obdobně jako je tomu u protokolů konvenčního měření.

Tělo protokolu – Úplně vlevo na každém řádku se nachází grafický symbol geometrické nebo rozměrové tolerance doplněný o textové označení měřeného prvku, což umožňuje rychlou orientaci. Následuje jmenovitý rozměr představující rozměr z výkresové dokumentace či 3D modelu. K ní jsou přiřazeny horní a dolní mezní úchytky, které definují toleranční pole. Další sloupce jsou vyhrazeny pro skutečnou hodnotu a pro ni přímo vypočtenou odchylku od jmenovitého rozměru. V případě, že se naměřená hodnota vybočí mimo toleranční pole, software vyčíslí hodnotu překročení tohoto limitu. Nejpřehlednější částí celého záznamu je pak závěrečné grafické znázornění pomocí indikátoru tolerance. Tento barevný vodorovný proužek vizuálně ukazuje polohu skutečné hodnoty v rámci tolerančního pole. Středová čára představuje ideální jmenovitý rozměr a krajní rysky mezní úchytky. Operátor tak na první pohled vidí, zda je výroba přesná, nebo zda se barevný proužek blíží k okraji a signalizuje blížící se neshodu.

		Measurement Report						
								
Date / time		: 14.05.2026 / 09:30				Jméno dílu		
Název dílu/Piece Title						Zákazník/Customer		
Č. výkresu/Drawing No.						Měřil/Measured		
Zakázka/Art. No.						Poznámka		
	Pos. No.	Line El.no.	Element name Characteristic	Nominal	Upper tol. Lower tol.	Actual	Deviation Error	Tol. graphic
Číslo objednávky/Order No.:								
Zák. č. Artiklu/Art. No.:								
	1	81 1	Vnější průměr 450k10 Průměr	450.000	0.250 0.000	450.045	0.045	
	1.1	82 2	Vnější průměr 450k10 Válcovitost		0.300 0.000	0.135	0.135	
	1.2	83 2	Vnější průměr 450k10 Kolmost		0.500 0.000	0.442	0.442	
	1.3	84 1	Přímost Přímost		0.250 0.000	0.090	0.090	
	2	134 3	Vnitřní průměr Průměr				-0.010	
	2.1	135 3	Vnitřní průměr Souosost				0.095	
	5	305 2	Výška paketu Vzdálenost ZX	120.000	0.500 -0.800	117.756	-2.244 -1.444	
	3.1	187 4	Patní průměr 430 Souosost		0.300 0.000	0.120	0.120	

Obr. 3-37 Hlavička a tělo měřicího protokolu vygenerovaný softwarem CMM

4 DISKUZE

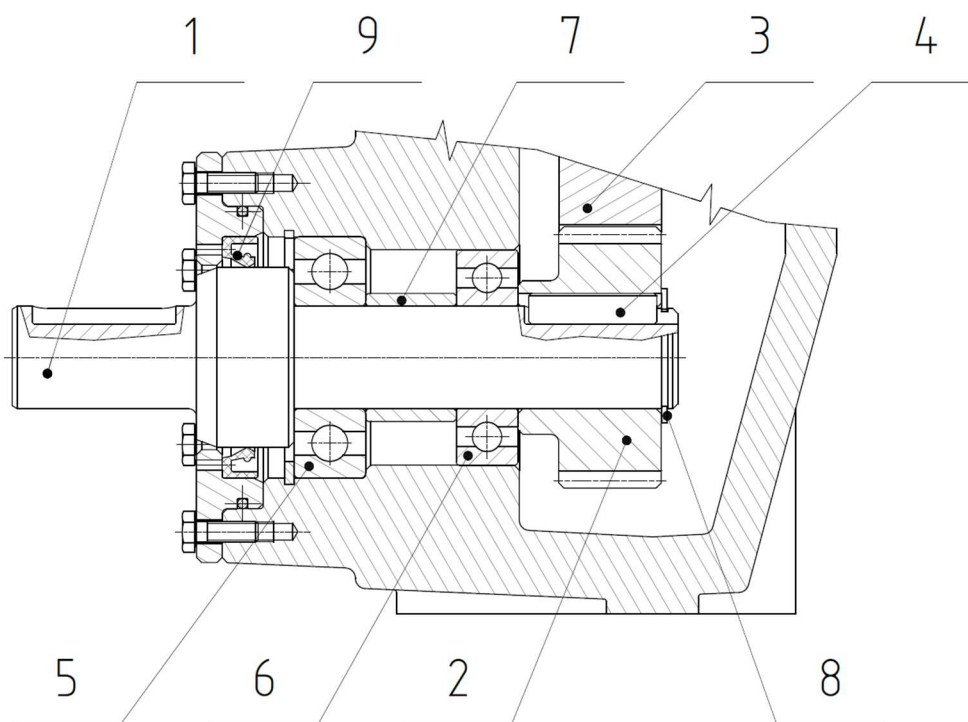
Předmětem této diskuse je zhodnocení přesnosti tří odlišných přístupů k měření rotační součásti. Zvolená metodika je založena na přímém srovnání vysoce přesného referenčního měření ze souřadnicového stroje (CMM), dat získaných pomocí optického 3D skeneru a výsledků z konvenčních dílenských měřidel.

4.1 Návrh měřené součásti

Jako zkušební vzorek pro praktická měření byla navržena stupňovitá hřídel. Její návrh primárně vychází z potřeby inovovat výukové pomůcky v předmětu Konstruování 2K. Dosud používaná zkušební součást sice umožňovala seznámení s měřením rozměrových a geometrických tolerancí, ale postrádala funkčnost a hlubší provázanost s navazujícími tématy předmětu.

Hřídel (poz. 1) proto byla koncipována jako reálný prvek sestavy jednostupňové převodovky do pomala s převodovým poměrem $i = 2$ (jednotlivé pozice v textu odkazují na detailní řez sestavy na Obr. 4-1). Na hřídeli je nasazen pastorek (poz. 2), jenž spoluzabíhá s ozubeným kolem (poz. 3). Krouticí moment je přenášen perem těsným (poz. 4). Hřídel je uložena ve dvou radiálních kuličkových ložiscích (poz. 5, 6), přičemž pro vhodné uložení jsou tato ložiska oddělena distančním kroužkem (poz. 7). Ložisko (poz. 6) je zde navrženo jako axiálně volné. Hřídel a komponenty na ní uložené jsou proti axiálnímu posunutí zajištěny vnějším pojistným kroužkem (poz. 8). Prostor mezi hřídelí a víkem je zatěsněn hřídelovým těsnicím kroužkem (poz. 9). Celkové uspořádání převodovky je pak doloženo na výkresu sestavení v přílohách.

Hřídel je navržena pro edukační účely v dalších fázích výuky nejen pro nácvik měření geometrických a rozměrových tolerancí, ale také pro demonstraci a výpočty rozměrových obvodů či ozubených kol.



Obr. 4-1 detailní řez sestavy – uložení měřené hřídele

Jmenovité rozměry, velikosti tolerančních polí a parametry drsnosti povrchu Ra pro jednotlivé funkční plochy byly voleny na základě platných technických norem.

Oproti standardním konstrukčním zvyklostem např. IT6 pro uložení ložisek byla toleranční pole funkčních ploch záměrně zvětšena na IT8. Tento krok byl nezbytný z výukových důvodů, aby při měření konvenčními úchylkoměry s nižší rozlišitelností např. 0,01 mm studenti reálně odečítali viditelné odchylky.

V konceptu byl pro válcový konec hřídele navržen rozměr $\varnothing 20$ j8. Jelikož se však jedná o atypickou kombinaci jmenovitého rozměru a toleranční třídy, narážíme na absenci normalizovaných hodnot. Z toho důvodu je v metodice následného vyhodnocení předem počítáno s tolerančním polem pro normalizovanou $\varnothing 20$ j7.

Z metrologického hlediska tento postup představuje aplikaci přísnějšího, hodnotícího kritéria. Toleranční stupeň IT7 vymezuje podstatně užší toleranční pole než výkresem předepsaný stupeň IT8. Pokud tedy skutečné rozměry součásti při měření vyhoví těmto zúženým limitům, lze garantovat, že splňují i volnější požadavky předepsané tolerance j8. Tímto způsobem zůstane plně funkční i geometrická vazba tolerance celkového obvodového házení na tento průměr.

Předpis geometrických tolerancí přímo vychází z funkčních požadavků na bezchybný chod převodovky:

Celkové obvodové házení – Předepsáno na volném válcovém konci hřídele. Což je nezbytné pro klidný chod spojovacího prvku a zamezení vzniku vibrací.

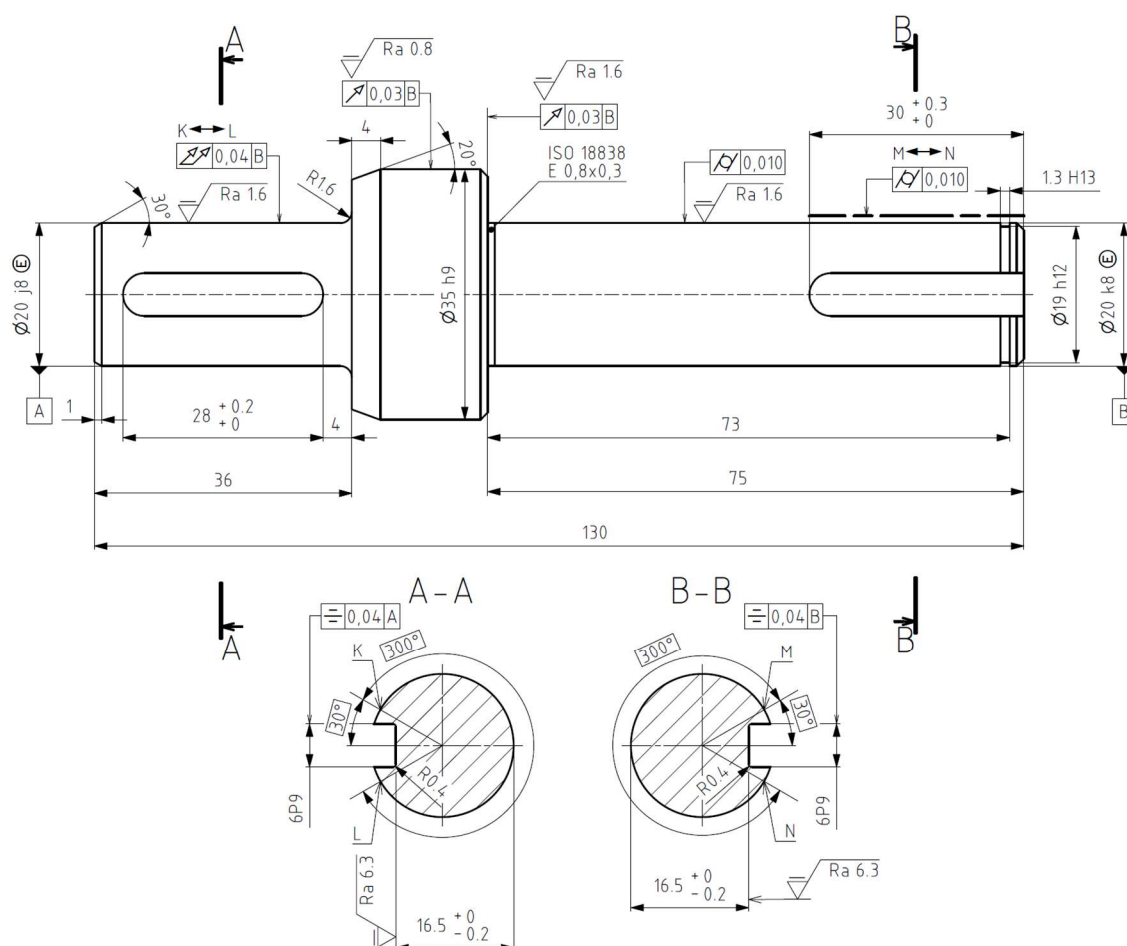
Kruhové obvodové házení – Zvoleno pro funkční plochu pod hřídelový těsnicí kroužek. Minimalizuje dynamické namáhání těsnicího břitu, čímž zajišťuje spolehlivou těsnost a předchází jeho předčasnému opotřebení.

Čelní kruhové házení – Předepsáno na čelo osazení hřídele, o které se axiálně opírá ložisko. Omezuje házení této opěrné plochy, čímž zabráňuje nepřipustnému naklopení vnitřního kroužku ložiska vůči vnějšímu za chodu.

Válcovitost – Předepsána na průměru pro uložení ložisek. Zajišťuje správný tvar plochy, zamezuje deformaci vnitřního kroužku ložiska a garantuje rovnoměrné rozložení zatížení.

Souměrnost – Aplikována na perodrážky, aby byla zaručena přesná poloha per vůči ose hřídele. Zajišťuje rovnoměrný přenos krouticího momentu a bezproblémovou montáž pastorku.

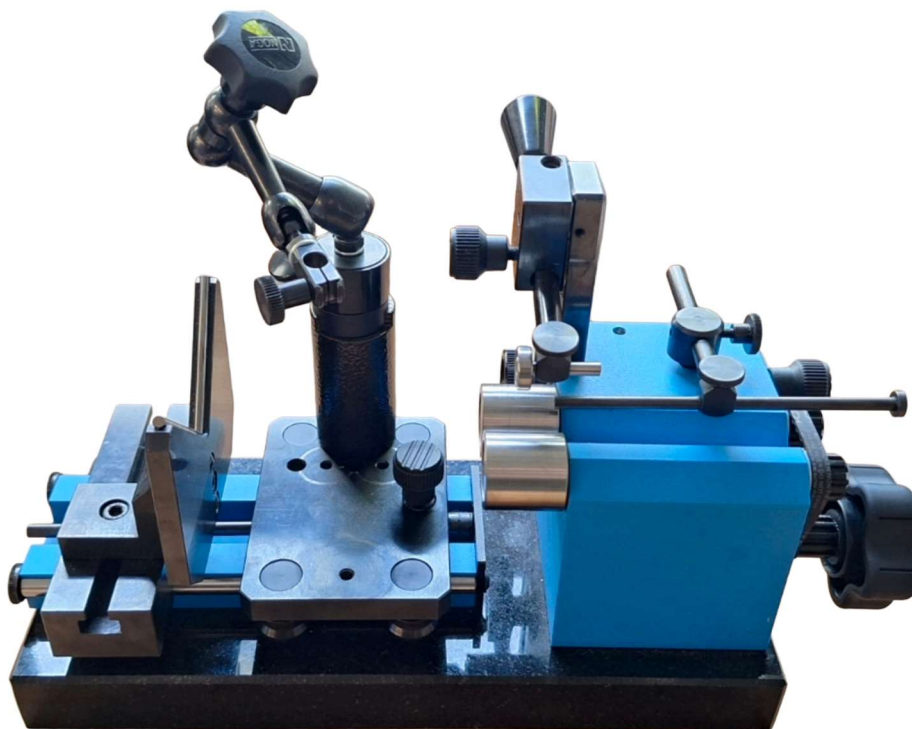
Hřídel je vyrobena z austenitické korozivzdorné oceli EN 1.4305 (dle starého značení ČSN 17 243). Tento materiál byl zvolen z důvodu vysoké odolnosti proti korozi, což je pro výukovou pomůcku, u které se předpokládá neustálá manuální manipulace klíčové.



Obr. 4-2 hřídel pro praktické měření

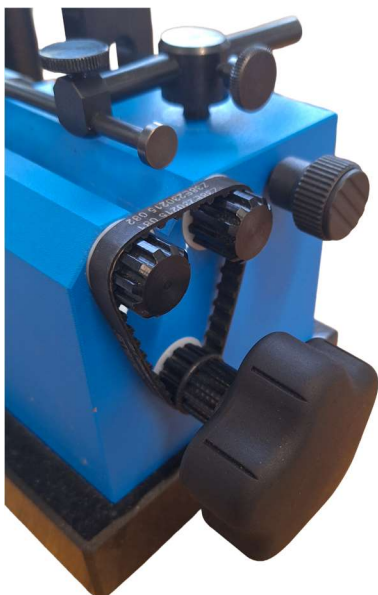
4.2 Měřicí zařízení

Pro praktické ověření geometrických tolerancí bylo využito měřicí zařízení od společnosti Norelem. Tento přístroj je primárně určen ke kontrole obvodového házení, soustřednosti a kolmosti, přičemž jeho konstrukce umožňuje spolehlivé měření jak v laboratorních podmínkách, tak přímo v dílenském provozu. Stabilitu a tuhost celého systému zajišťuje žulový podstavec. Z hlediska upínacích možností je přístroj limitován zkušební oblastí, která dovoluje kontrolu součástí v rozsahu průměrů od $\varnothing 5$ mm do $\varnothing 35$ mm.

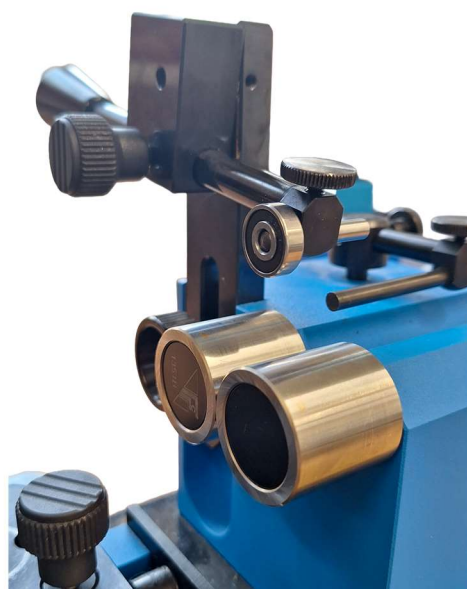


Obr. 4-3 3D sestava měřicího zařízení

K pohonu měřené součásti slouží polohovací mechanismus s ozubeným řemenem, který je umístěn na pravé straně zařízení. Ten zajišťuje plynulou rotaci dvou kontaktních válečků, po kterých se hřídel odvaluje. Pro zamezení nežádoucího pohybu ve svislém směru a zajištění stálého kontaktu s odvalovacími válečky je přístroj vybaven odpruženým přitlačným mechanismem. Působením síly pružiny je součást bezpečně zajištěna, což výrazně optimalizuje proces plynulého odvalování a eliminuje riziko jejího naklánění či nadzvednutí během měření.

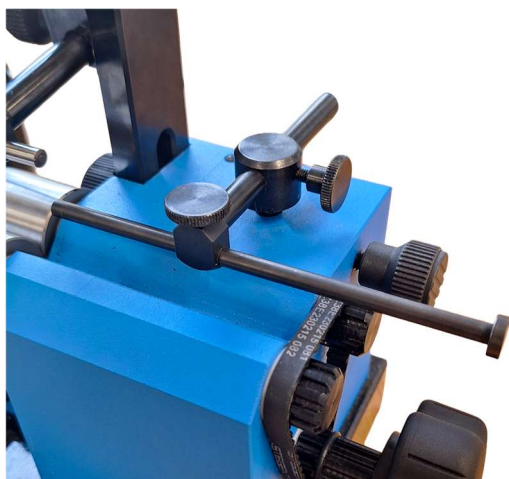


Obr. 4-4 mechanismus rotačního polohování

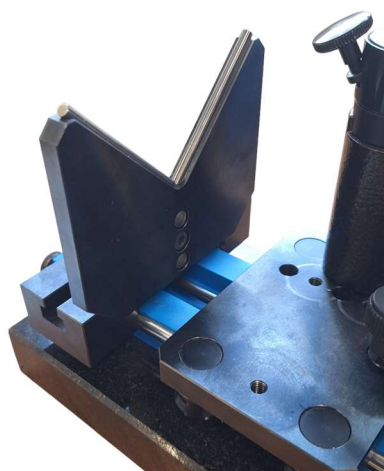


Obr. 4-5 kontaktní válce s tlačným mechanismem

K zajištění hřídele v podélném směru slouží nastavitelný doraz. Jeho použití se ukázalo jako nezbytné především při kontrole kruhového čelního házení, kde spolehlivě zabráňoval axiálnímu posunutí součásti, a tím předcházet zkreslení naměřených hodnot. Pro upnutí delších součástí je zařízení vybaveno saněmi, které nesou opěrné prizma V-drážky. V rámci tohoto měření bylo prizma využito k dodatečnému podepření volného konce hřídele při kontrole válcovitosti. Tím se zajistila vyšší tuhost soustavy a eliminovalo se nežádoucí naklápění součásti vlivem její vlastní tíhy a přítlačné síly měřicího doteku od úchylkoměru. Konstrukce s prizmatem rovněž umožňuje přesné ustavení součástí definovaných společnou základnou, nicméně tento funkční požadavek nebyl u zkoumaného vzorku předepsán.

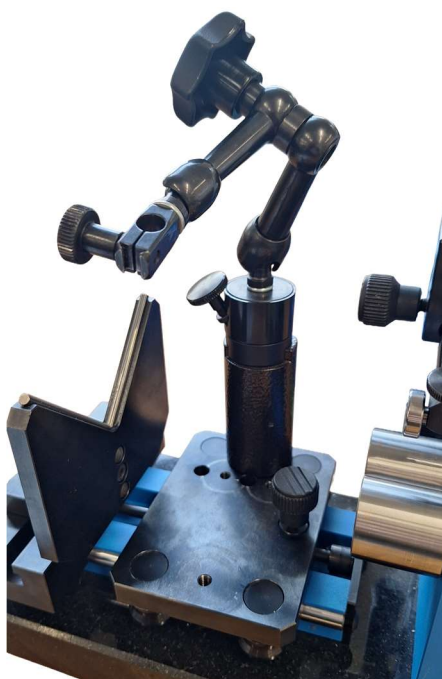


Obr. 4-6 mechanismus dorazu



Obr. 4-7 saně s prizmatem

Snímání samotných úchylek je realizováno pomocí úchylkoměru upnutého v kloubovém držáku, který je umístěn na vodících saních. Tyto druhé saně umožňují plynulý pojezd rovnoběžně s podélnou osou měřené součásti.



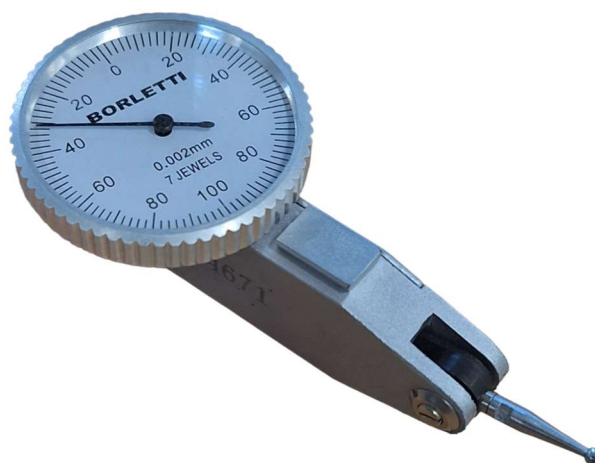
Obr. 4-8 saně s kloubovým držákem měřidla

Měření geometrických tolerancí bylo realizováno pomocí dvou typů měřidel, která byla zvolena s ohledem na charakter tolerovaných prvků a požadovanou přesnost vyhodnocení. Pro kontrolu kruhového i celkového obvodového házení a pro stanovení válcovitosti byl použit klasický číselníkový úchylkoměr s rozlišitelností 0,001 mm. Plně tak vyhovuje nárokům na přesné zachycení tvarových nepřesností.

Pro měření čelního kruhového házení byl využit páčkový úchylkoměr s rozlišitelností 0,002 mm. Volba tohoto přístroje byla dána především jeho konstrukcí, která umožňuje optimální přístup k čelním plochám osazení. Podrobné teoretické a konstrukční specifiky obou typů úchylkoměrů jsou detailně zpracována v kapitole 3.5.3



Obr. 4-9 číselníkový úchylkoměr



Obr. 4-10 páčkový úchylkoměr

4.3 Vyhodnocení referenčního měření výrobce

Jako referenční etalon pro zhodnocení přesnosti výroby a následné porovnání s dalšími metodami měření byl využit měřicí protokol ze souřadnicového měřicího stroje, který dodala společnost JPVKOVO (kompletní protokol je doložen v přílohách).

Analýza rozměrových tolerancí – Kontrola se zaměřila na tři válcové funkční plochy osazení, u kterých je striktně předepsáno toleranční pole zaručující správné uložení, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1. Konkrétně se jedná se o rozměry Ø20 j8 (j7), Ø35 h9 a Ø20 k8. Dále byly z rozměrových tolerancí měřeny dvě délkové, a to konkrétně šířky perodrážek 6P9.

Z naměřených dat vyplývá, že výrobní proces dosahuje v oblasti délkových rozměrů vysoké přesnosti. Z grafické interpretace je zřejmé, že skutečné hodnoty se nacházejí v bezpečné vzdálenosti od hraničních limitů zmetkovitosti.

Analýza geometrických tolerancí – Protokol vyhodnocuje předepsané celkové a kruhové obvodové házení, čelní kruhové házení, válcovitost a dvě tolerance symetrie perodrážek. Nad rámec výkresu protokol obsahuje i hodnoty souososti. Je to dáno tím, že CMM software souosost vypočítává jako matematický základ pro určení celkového a kruhového obvodového házení.

Ačkoliv jsou všechny parametry vyhovující, z grafických indikátorů v protokolu lze vyčíst, že úchylka tolerance symetrie vyčerpává přibližně 75 až 80 % povoleného tolerančního pole. V porovnání s ostatními geometrickými tolerancemi se nacházejí mnohem blíže mezní úchylce. Tento jev ukazuje, že dosažení požadované geometrické přesnosti a udržení osy symetrie perodrážky vůči ose rotace závislé zejména na přesnosti upnutí polotovaru je pro daný výrobní proces výrazně náročnější než pouhé dodržení délkových rozměrů.

Z celkového vyhodnocení protokolu je patrné, že u všech kontrolovaných znaků nebyla překročena maximální povolená odchylka a kontrolovaná hřídel byla vyrobena ve shodě s výkresovou dokumentací.

4.4 Vyhodnocení dílenského měření

Veškeré naměřené hodnoty získané během dílenského měření, včetně jejich tabulkového zpracování a odpovídajících grafických výstupů, jsou detailně zpracovány v laboratorním protokolu, který tvoří přílohu této práce. Níže je popsána metodika sběru dat a vyhodnocení pro jednotlivé rozměrové a geometrické tolerance.

4.4.1 Rozměrové tolerance

Kontrola všech průměrů na hřídeli probíhala formou pěti měření třmenovým mikrometrem v různých místech daných válcových ploch. Z těchto dílčích hodnot byl vždy vypočítán aritmetický průměr $\bar{x}$ reprezentující měřený rozměr prvku. Tento výsledek byl následně porovnán s předepsaným tolerančním polem pro vyhodnocení celkové shody s výkresovou dokumentací.

Rozměr	Ø35 h9 [mm]	Ø20 j8 (j7) [mm]	Ø20 k8 [mm]
Max [mm]	34,985	20,01	20,025
Min [mm]	34,97	20,002	20,02
Průměr [mm]	34,9804	20,005	20,0212
Tolerance	h9 (0/-0,062)	j7 (0,013/-0,008)	k8 (0,033/-0)
HMR [mm]	35	20,013	20,033
DMR [mm]	34,938	19,992	20
Stav	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE

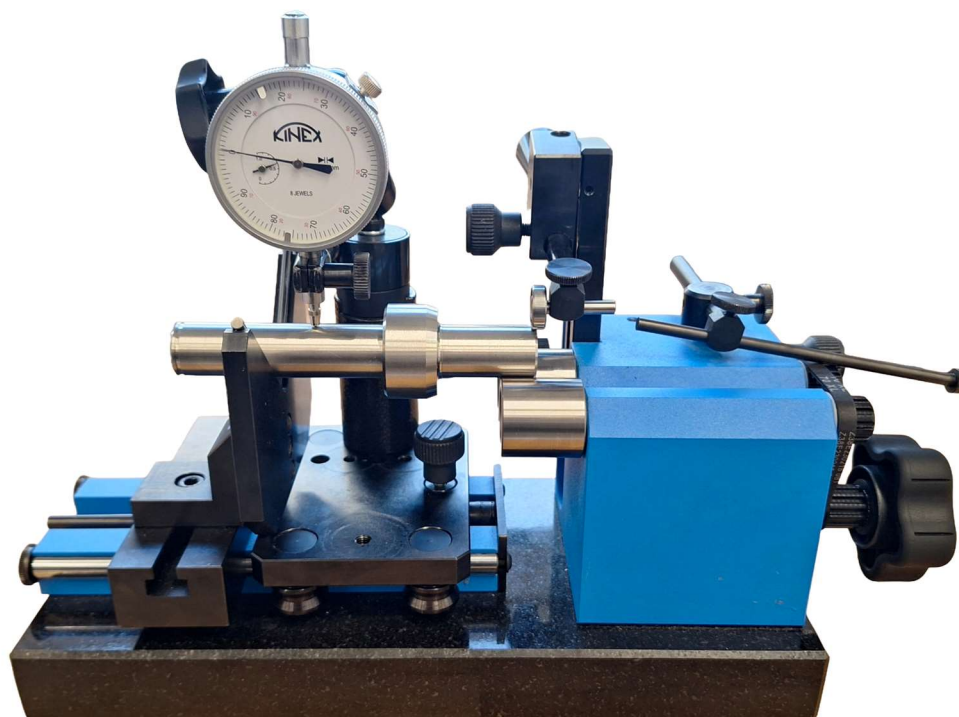
Ø35 h9 [mm] 34,938 35	Ø20 j8 (j7) [mm] 19,992 20,013	Ø20 k8 [mm] 20 20,033
---	--	---

Tab. 4-1 vyhodnocení rozměrových tolerancí

4.4.2 Geometrické tolerance

Samotné vyhodnocení geometrických specifikací probíhalo na základě výpočtu prostřední hodnoty, která byla určena jako polovina součtu maximální a minimální naměřené úchylky. Kolem této hodnoty bylo následně vymezeno toleranční pásmo ohraničené horní (USL) a dolní (LSL) mezí. Tyto limitní hodnoty byly konstruovány přičtením, respektive odečtením poloviny hodnoty příslušné tolerance od vypočtené prostřední hodnoty.

Válcovitost – Měření odchylky válcovitosti bylo realizováno na měřicím přípravku, kde byla hřídel ustavena do kontaktních válců a podepřena prizmatem. K odečtení hodnot byl využit číselníkový úchylkoměr upevněný v kloubovém držáku. Kontrola probíhala celkem ve třech příčných měřicích rovinách. V každé z těchto rovin bylo prostřednictvím rotačního mechanismu zaznamenáno pět hodnot v pravidelných úhlových rozestupech. Mezi jednotlivými cykly měření byla hřídel posouvána v axiálním směru, čímž bylo pro finální vyhodnocení válcovitosti získáno celkem 15 naměřených hodnot.



Obr. 4-11 měření válcovitosti

Válcovitost	
Max [μm]	7
Min [μm]	-2
Odchylka [μm]	9
Tolerance	10
Stav	VYHOVUJE

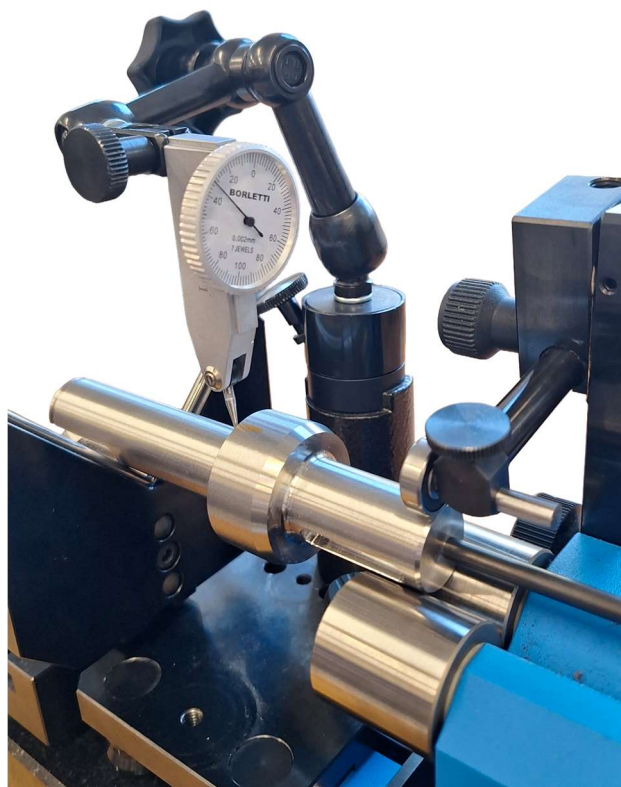
Válcovitost [μm]

10

0

Tab. 4-2 vyhodnocení válcovitosti

Kruhové čelní házení – Kontrola čelního kruhového házení byla prováděna pomocí páčkového úchylkoměru. Ustavení hřídele v měřicím přípravku zůstalo shodné jako u měření válcovitosti, avšak pro zajištění přesné axiální polohy byla hřídel navíc podepřena dorazovým mechanismem. Úchylkoměr byl upevněn tak, aby jeho měřicí dotyk směřoval kolmo ke kontrolovanému čelu hřídele, čímž byla eliminována nutnost korekce naměřených hodnot. Měření probíhalo v jedné kružnici, přičemž během jedné plné otáčky hřídele bylo v pravidelných úhlových rozestupech zaznamenáno celkem 10 hodnot.

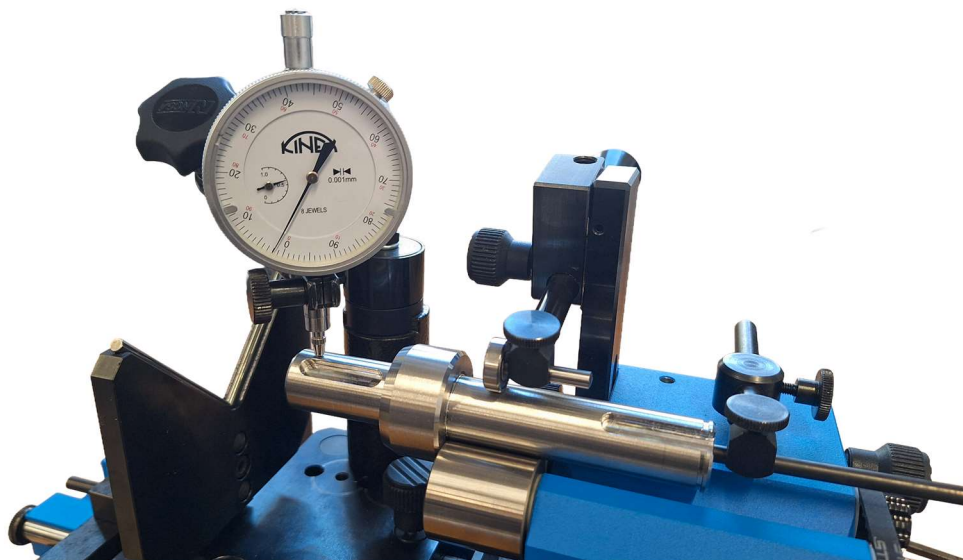


Obr. 4-12 měření kruhového čelního házení

Kruhové čelní házení	
Max [μm]	3
Min [μm]	-1
Odchylka [μm]	4
Tolerance	30
Stav	VYHOVUJE
Kruhové čelní házení [μm] 0 30	

Tab. 4-3 vyhodnocení kruhového čelního házení

Celkové obvodové házení – Pro kontrolu celkového obvodového házení byl opět využit standardní číselníkový úchylkoměr. Zásadní změnou oproti předchozím postupům bylo ustavení hřídele. Součást byla uložena výhradně do kontaktních válců, které fyzicky reprezentují předepsanou referenční základnu definovanou výkresovou dokumentací. Aby se předešlo nežádoucímu zapadnutí dotyku do perodrážky. Kontrola se omezila pouze na úhlový úsek 300°. V rámci těchto tří měřicích rovin bylo na definovaném kruhovém výseku postupně odečteno celkem 15 hodnot.

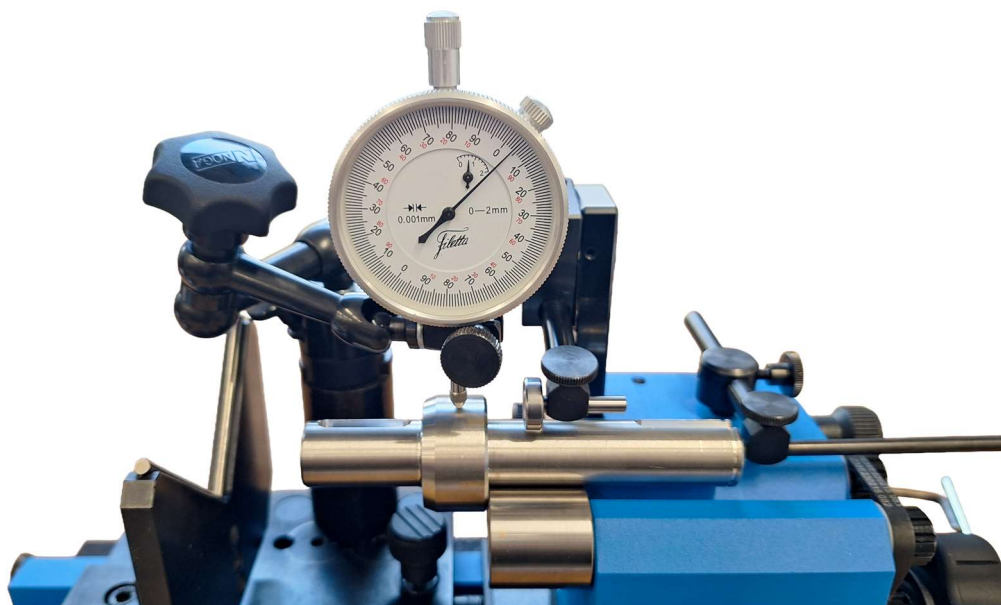


Obr. 4-13 měření celkového obvodového házení

Celkové obvodové házení	
Max [μm]	6
Min [μm]	0
Odchylka [μm]	6
Tolerance	40
Stav	VYHOVUJE
Celkové obv. házení [μm] 	

Tab. 4-4 vyhodnocení celkového obvodového házení

kruhové obvodové házení – Měření kruhového obvodového házení bylo realizováno při identickém ustavení hřídele jako v případě celkového házení, tedy s využitím výhradně kontaktních válců k definování referenční základny. Na rozdíl od předchozího měření se však kontrola omezila pouze na jednu vybranou měřicí rovinu (jeden příčný řez) nacházející se na jiném funkčním stupni hřídele. Během jedné kompletní otáčky hřídele bylo zaznamenáno 15 hodnot.



Obr. 4-14 měření kruhového obvodového házení

Kruhové obvodové házení	
Max [μm]	0
Min [μm]	-1
Odchylka [μm]	1
Tolerance	30
Stav	VYHOVUJE

Kruhové obv. házení [μm]

0

30

Tab. 4-5 vyhodnocení kruhového obvodového házení

Slovní vyhodnocení – Při interpretaci naměřené odchylky válcovitosti ($9\text{ }\mu\text{m}$) je nutné zohlednit systematickou chybu ustavení. Vlivem nepatrného výškového rozdílu mezi prizmatem a kontaktními válci. Osa hřídele nebyla dokonale rovnoběžná s dráhou axiálního posuvu držáku úchylkoměru. Vzniklý úhlový sklon se tak během měření promítl jako falešný lineární nárůst úchylky. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že skutečná chyba tvaru součásti je reálně nižší, než udává naměřený výsledek.

Zbývající sledované geometrické tolerance vykazují velmi nízké hodnoty odchylek splňují tak předepsané toleranční limity. K těmto příznivým a přesným výsledkům přispělo korektní ustavení v měřicím přípravku. Využití kontaktních válců spolehlivě fyzicky simulovalo předepsanou výkresovou základnu. Vzhledem k tomu, že měření probíhalo plynulým pootáčením hřídele přímo na těchto pevných podporách, nedocházelo k vnášení parazitních chyb z přidavných vodících mechanismů přípravku. Naměřená data lze proto považovat za vysoce spolehlivá a hodnocené prvky za plně vyhovující.

Z objektivních důvodů nebyla v rámci tohoto laboratorního měření hodnocena tolerance souměrnosti, která je výkresovou dokumentací předepsána pro funkční perodrážky. K exaktnímu a spolehlivému vyhodnocení této tolerance je v průmyslové praxi standardně využíván 3D souřadnicový měřicí stroj, případně specializované kalibry, které nebyly v daných podmínkách školní laboratoře k dispozici. Dílenskými měřidly nelze tuto specifikaci s dostatečnou přesností a opakovatelností ověřit.

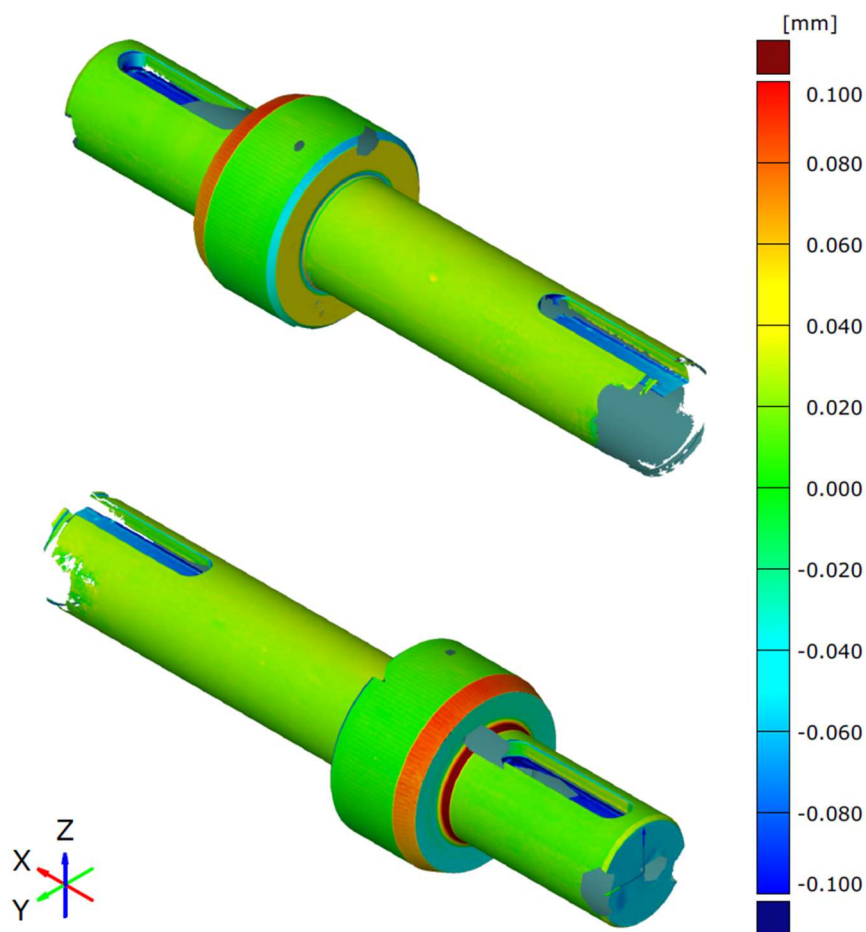
4.5 Vyhodnocení měření optickým 3D skenerem

Před zahájením samotného procesu optického měření byl povrch hřídele důkladně očištěn. Vzhledem k lesklému povrchu měřené hřídele bylo nezbytné nanést tenkou, homogenní vrstvu antireflexního zmatňujícího spreje AESUB Orange, která zabraňuje odrazům světla a umožňuje korektní digitalizaci hodnot. Pro prostorovou orientaci a bezchybné skládání jednotlivých naskenovaných snímků byly na povrch hřídele rovnoměrně aplikovány samolepicí referenční body.

Měřená hřídel byla vertikálně ustavena na jedno ze svých čel přímo na pracovní plochu otočného stolu. Tímto uspořádáním se předešlo nutnosti změny polohy součásti během měření a eliminovalo se riziko vzniku chyb při spojování jednotlivých naskenovaných pohledů. Digitalizace probíhala kombinací plynulých vertikálních pohybů 3D skeneru a rotačního pohybu stolu se součástí.

Po dokončení měření následovala fáze čištění polygonální sítě. Z digitálního modelu byly odfiltrovány nežádoucí okolní plochy a byly korigovány lokální nedokonalosti sítě. Největší výskyt anomálií byl zaznamenán v hůře dostupných oblastech, konkrétně v zápichu pro pojistný kroužek a na stranách obou perodrážek; tato nekorektní data byla ze skenu manuálně odstraněna.

Očištěná polygonální síť byla následně importována do metrologického softwaru, kde byla virtuálně zarovnána s nominální geometrií CAD modelu. Software následně matematicky vypočítal prostorové rozdíly mezi oběma modely a vygeneroval 3D barevnou mapu odchylek. Teplé odstíny barevného spektra indikují přebytek materiálu, zatímco chladné odstíny značí nedostatek materiálu. Výstupem tohoto porovnání je finální protokol, který je doložen v přílohách.



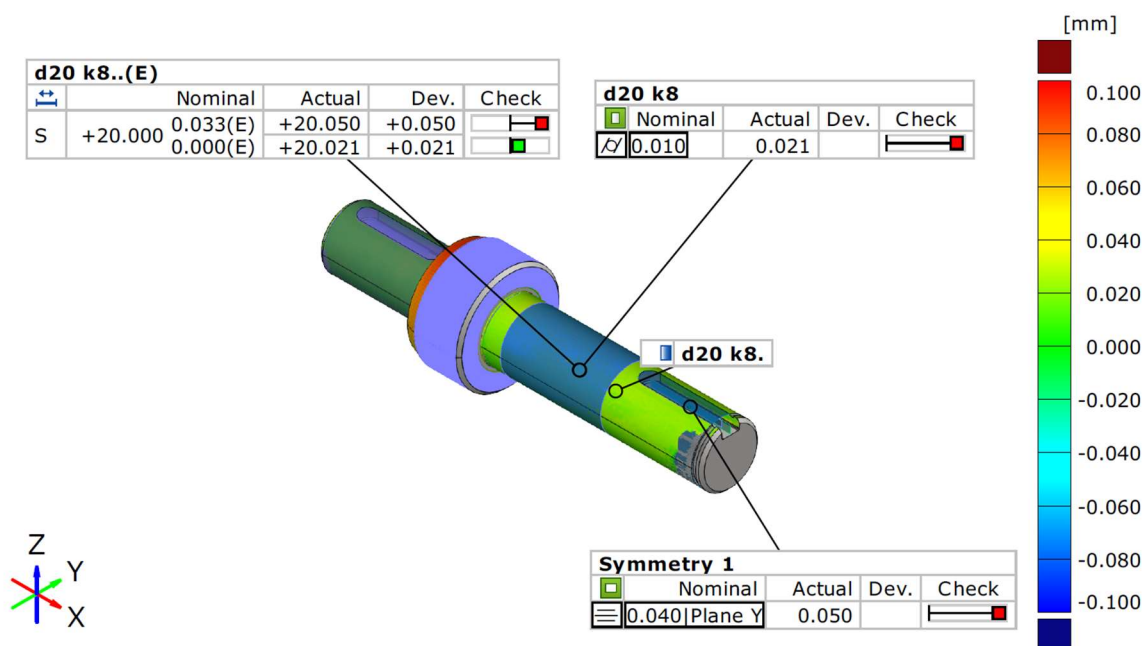
Obr. 4-15 barevná mapa

Na základě vygenerovaného protokolu ze softwaru pro 3D metrologii byly posouzeny klíčové funkční plochy hřídele.

Rozměr Ø20 k8 – Vyhodnocení prvku probíhalo s ohledem na předepsaný požadavek obálky (E). Z naměřených dat je zřejmé, že skutečný průměr nejmenšího opsaného válce (obálky) dosáhl hodnoty 20,050 mm. Tato hodnota se nachází mimo předepsané toleranční pole, neboť překračuje horní mezní rozměr (HMR).

Válcovitost – Skutečná odchylka tvaru 0,021 mm je z hlediska výkresové dokumentace nevyhovující, jelikož překračuje maximální přípustnou hodnotu 0,010 mm.

Symetrie perodrážky – Naměřená hodnota úchytky symetrie činí 0,050 mm, což znamená překročení maximální přípustné hodnoty, která je 0,040 mm.

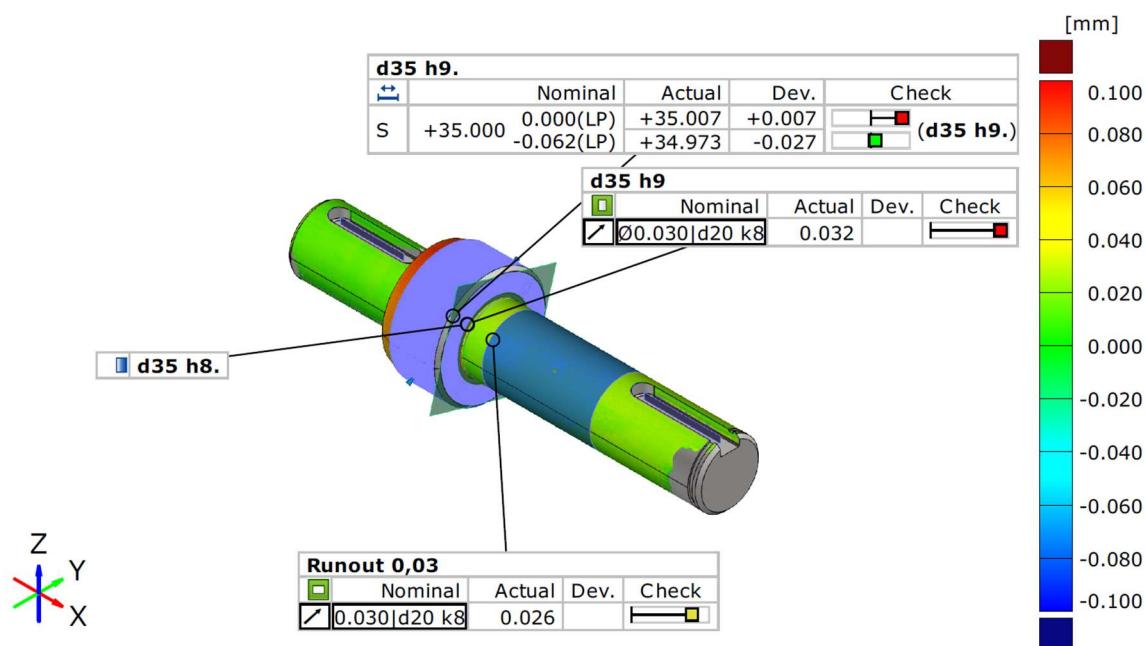


Obr. 4-16 vyhodnocení symetrie, Ø20 k8 a válcovitosti

Rozměr Ø35 h9 – U vyhodnocení prvku byl aplikován princip nezávislosti, software tedy vyhodnocoval lokální dvoubodové rozměry (LP). Z protokolu vyplývá, že maximální naměřený rozměr dosáhl hodnoty 35,007 mm. Tento výsledek se nachází nad hranicí horního mezního rozměru (HMR), což činí prvek z hlediska velikosti nevyhovujícím.

Kruhové obvodové házení – Kontrola rovněž prokázala překročení tolerance, jenž dosahuje 0,032 mm oproti povoleným 0,030 mm.

Čelní kruhové házení – Skutečná naměřená úchytky činí 0,026 mm, což znamená, že prvek z hlediska softwarového vyhodnocení vyhověl předepsané toleranci 0,030 mm. Grafický výstup protokolu však tuto shodu indikuje varovnou žlutou barvou, neboť je toleranční pole téměř vyčerpáno.

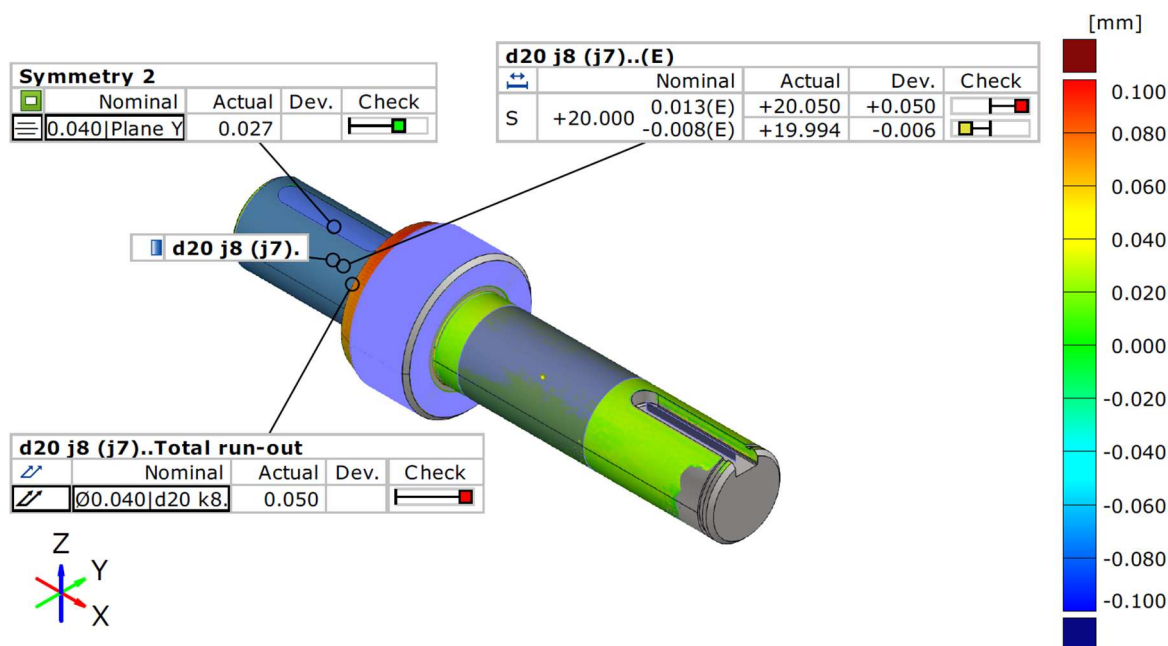


Obr. 4-17 vyhodnocení čelního kruhového házení, Ø35 h9 a kruhového obvodového házení

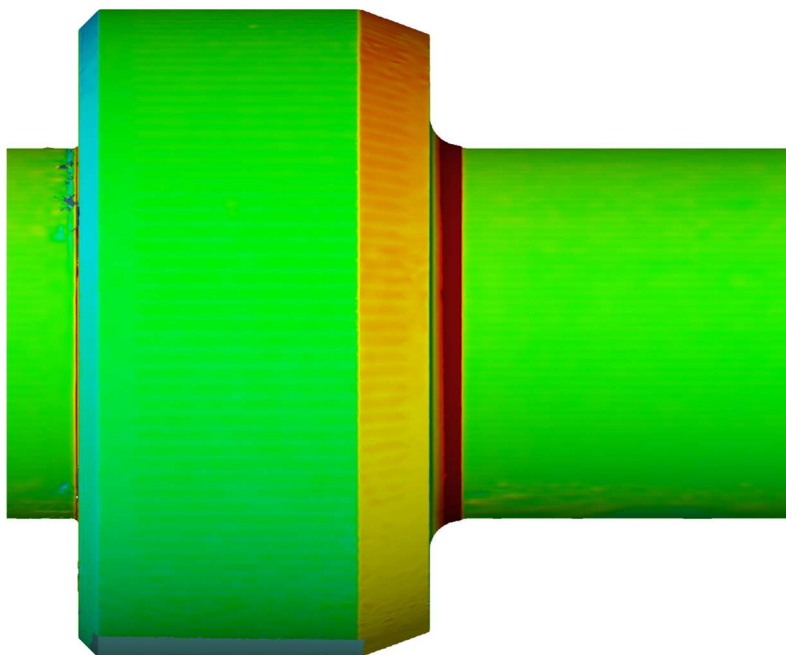
Rozměr Ø20 j8 (j7) – Vyhodnocení prvku probíhalo s ohledem na předepsaný požadavek obálky (E). Průměr obáلكového válce 20,050 mm výrazně převyšuje stanovený horní mezní rozměr (HMR), jenž má hodnotu 20,013 mm. Prvek tak nesplňuje rozměrové požadavky.

Celkové obvodové házení – naměřená úchylka 0,050 mm je nedostačující a bezpečně přesahuje předepsané toleranční pole 0,040 mm.

Symetrie perodrážky – Zjištěná hodnota úchylky symetrie 0,027 mm se nachází uvnitř předepsaného tolerančního pole 0,040 mm, čímž je potvrzena shoda s výkresovou dokumentací.



Barevná mapa odchylek odhalila nedobroušný přechod válcového konce hřídele do osazení, kde zůstal neodebraný přídavek materiálu po soustružení. Konstrukčně je zde v souladu s normami pro konce hřídelů správně předepsán přechodový rádius R1,6 namísto běžného zápichu, aby se zamezilo nebezpečnému vrubovému účinku. Přestože skener tuto oblast správně vyhodnotil jako technologickou vadu, při montáži standardní spojky či řemenice by tento lokální přebytek materiálu funkčně nepřekážel.



Obr. 4-19 Detail mapy s patrným nedobroušením přechodového rádiusu čela hřídele.

4.5.1 Vliv zmatňujícího spreje

Rozměrové tolerance – Při křížovém porovnání dat z optického 3D skenování s referenčním měřením na souřadnicovém stroji (CMM) a s ručním kontrolním měřením třmenovým mikrometrem je zřejmé, že skenovaný model vykazuje plošné zvětšení všech vnějších rozměrů. Konkrétní odchylky optického skenu vůči referenčnímu CMM měření činí 29 μm u průměru Ø20 k8, 45 μm u průměru Ø20 j8 (j7) a 21 μm u průměru Ø35 h9. Jelikož ruční i CMM měření se vzájemně téměř shodují a potvrzují, že je hřídel vyrobena dle výkresové dokumentace, je příčinou nárůstu rozměrů výhradně aplikace zmatňujícího spreje. Z naměřených rozdílů na průměrech lze vyvodit, že reálná tloušťka vytvořeného filmu se pohybuje přibližně v rozmezí 10 až 25 μm na jednu stěnu.

Geometrické tolerance – Zjištěný rozptyl v nárůstech jednotlivých průměrů jasně dokazuje, že zmatňující povlak nebyl a z podstaty ruční aplikace sprejem z nádoby ani nemohl být nanesen absolutně rovnoměrně. Tato lokální nehomogenita a shlukování spreje má fatální dopad na vyhodnocení geometrických tolerancí. Software tyto uměle vytvořené nerovnosti na povrchu filmu interpretuje jako reálné odchylky tvaru či polohy. Ať už vyhovující či nevyhovující výsledek tak mohl vzniknout čistě nahodilým nanesením vrstvy v daném místě, případně mohl sprej dokonce kompenzovat a zamaskovat drobnou reálnou nepřesnost výroby.

5 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývala návrhem, a komplexním metrologickým posouzením rotační součásti (hřídele) určené pro výukové účely. Hlavním cílem bylo provést křížové porovnání tří odlišných přístupů ke kontrole rozměrových a geometrických tolerancí: referenčního měření na 3D souřadnicovém stroji (CMM), konvenčního dílenského měření a moderní metody optického 3D skenování. Konstrukční návrh součásti byl záměrně přizpůsoben didaktickým potřebám, což se projevilo volbou širších tolerančních polí, aby bylo umožněno názorné vyhodnocení odchylek konvenčními měřidly. Lze konstatovat, že všechny stanovené cíle práce byly beze zbytku splněny.

Referenční měření na stroji CMM potvrdilo, že hřídel byla vyrobena s vysokou přesností a splňuje výkresovou dokumentaci. Následné konvenční měření pomocí mikrometrů a úchylkoměrů prokázalo až překvapivě vysokou míru shody s referenčními daty. Zjištěné výsledky potvrzují, že pro kontrolu běžných tolerancí v kusové výrobě je tradiční dílenské vybavení při dodržení správných metrologických postupů plně dostačující a spolehlivé.

Nejvýznamnějším a nejprínosnějším zjištěním této práce je však kritické zhodnocení metody optického 3D skenování. Ačkoliv je tato technologie často prezentována jako univerzální, výsledky měření jednoznačně prokázaly její technologické limity při kontrole přesných strojírenských součástí s lesklým povrchem. Nutnost aplikace zmatňujícího spreje vnesla do měření systematickou chybu v podobě aditivní vrstvy o tloušťce přibližně 10 až 25 μm . Tato mikroskopická, avšak lokálně nerovnoměrná vrstva způsobila nejen falešné zvětšení všech sledovaných průměrů mimo předepsané tolerance, ale fatálně zkreslila i vyhodnocení geometrických tolerancí tvaru a polohy. Software uměle vytvořené nerovnosti spreje interpretoval jako reálné vady součásti.

Zobecněním dosažených výsledků lze konstatovat, že pro komplexní ověření přesných strojních dílů v tolerancích IT7 a IT8 je optické 3D skenování i při použití sublimačního spreje stále limitující. Přestože tato technologie nabízí nespornou výhodu čistého provozu bez nutnosti následného mytí dílů, vytvořený film vykazuje při ruční aplikaci natolik nekonzistentní tloušťku a lokální shlukování, že znemožňuje precizní metrologické vyhodnocení přesných tolerancí. Tímto zjištěním se otevírá zajímavý prostor pro další výzkum a navazující závěrečné práce. Mohly by se zaměřit například na zkoumání vlivu různých metod aplikace sublimačního povlaku jako je například automatizovaný nástřik pro zajištění homogenity vrstvy nebo vlivu času na tloušťku vrstvy během procesu odpařování.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Základy - Pojmy, principy a pravidla*. 2/12. 2012.
- [2] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – ISO systém kódu pro tolerance lineárních rozměrů – Část 1: Základní tolerance, úchytky a uložení*. Duben 2011. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [3] SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Základy konstruování*. Vydání desáté, přepracované a doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2023. ISBN 978-80-7623-111-5.
- [4] BUDYNAS, Richard G. a J. Keith NISBETT. *Shigleyho konstruování strojních součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTUM, 2023. ISBN 978-80-214-5471-2.
- [5] PETR, Karel. *Geometrické tolerance dle ISO GPS*. Praha: Verlag Dashöfer, [2019]. ISBN 978-80-7635-019-9.
- [6] KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT. *Technické kreslení*. Brno: CP Books, 2005. ISBN 80-251-0498-2.
- [7] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Obecné pojmy - Část 1: Model pro geometrickou specifikaci a ověření*. 7/22. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022.
- [8] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Březen 2020. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [9] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Základny a soustavy základen*. 7/22. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022.

- [10] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Geometrické tolerování – Požadavek maxima materiálu (MMR), požadavek minima materiálu (LMR) a požadavek reciprocity (RPR)*. Listopad 2022. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022.
- [11] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření pro SPŠ strojní*. Praha: Information, 2009. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [12] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství Cerm vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, 2009. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-4010-4.
- [13] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Surface plates - Part 2: Granite*. Genève: International Organization for Standardization, 1990.
- [14] ÚŘAD PRO VYNÁLEZY A NORMALIZACI. *Kontrolní a rýsovací nářadí. Kontrolní a rýsovací podložky s jedním zářezem*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro vynálezy a normalizaci, 1957.
- [15] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1. Dostupné také z: http://toc.nkp.cz/NKC/200904/contents/nkc20081790461_1.pdf
- [16] MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. 3D skenery pro použití v průmyslu. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2015, **2015**(12), str. 34-37 [cit. 2026-04-22]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/3d-skenery-pro-pouziti-v-prumyslu-2015_12_54325_7351/

Využití generativní AI:

Google. Gemini. Online, generativní AI. Verze Gemini 3.1 Pro. 17. května 2026. Dostupné z: <https://gemini.google.com/>. [cit. 2026-05-17]. Použito pro konzultaci struktury, jazykovou korekturu a stylistické přeformulování.

7 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Výrobní výkres součásti – Hřídel

Příloha B: Výkres sestavy – Převodovka

Příloha C: Měřicí protokol – paket statoru

Příloha D: Měřicí protokol ze souřadnicového stroje (CMM)

Příloha E: Laboratorní protokol z dílenského měření

Příloha F: Měřicí protokol z optického 3D skeneru