



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VYHODNOCOVÁNÍ GEOMETRICKÝCH TOLERANCÍ
POMOCÍ 3D OPTICKÉ DIGITALIZACE**

EVALUATION OF GEOMETRIC TOLERANCES USING 3D OPTICAL DIGITIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matouš Veik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Matouš Veik
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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:

Vyhodnocování geometrických tolerancí pomocí 3D optické digitalizace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aplikaci a vyhodnocení rozměrových a geometrických tolerancí popisují normy ISO 1101 (a další) a ASME Y14.5. Jednak jsou mezi těmito normami rozdíly a navíc často chybí znalost jejich aplikace v inspekčním softwaru. Záměrem je prostudovat a posoudit rozdíly mezi těmito normami z hlediska návrhu a kontroly geometrických tolerancí a posoudit jejich implementaci v inspekčním softwaru GOM Inspect.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je posouzení aplikace norem ISO a ASME Y14.5 v softwaru GOM Inspect pro vyhodnocení geometrických tolerancí na základě 3D skenovaných dat součástí.

Díličí cíle bakalářské práce:

- zpracovat přehled ISO norem vztahujících se k aplikaci geometrických tolerancí,
- analyzovat rozdíly v aplikaci geometrických tolerancí v ISO a ASME normách,
- na zvoleném typu geometrické tolerance analyzovat jeho aplikaci v softwaru GOM Inspect,
- na zvoleném prvku testovacího dílu zhodnotit aplikaci geometrické tolerance zvoleného typu s využitím norem ISO a ASME.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

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

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

HENZOLD, G. Geometrical dimensioning and tolerancing for design, manufacturing and inspection: a handbook for geometrical product specifications using ISO and ASME standards. 2nd ed. London: Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 978-0-7506-6738-8.

ISO 1101: 2012, Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out. Third edition. Switzerland: International Organization for Standardization, 2012.

ASME Y14.5: 2009, Dimensioning and Tolerancing. Second edition. USA: ASME, 2009.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vyhodnocováním geometrických tolerancí na modelech získaných pomocí 3D optické digitalizace. V první části je zpracována problematika optické digitalizace v oblasti standardizace optických systémů. Další část bakalářské práce popisuje postup vyhodnocování geometrických specifikací. Cílem této práce je porovnání vyhodnocování geometrických tolerancí dle norem ISO a ASME a jejich aplikace v softwaru GOM Inspect.

Klíčová slova: optická digitalizace, geometrické tolerance, GPS, GOM.

ABSTRACT

Bachelor's thesis deals with evaluation of geometric tolerances on models obtained by 3D optical digitization. In the first part is analyzed problematics of optical digitization in the field of standardization of optical systems. Another part of the bachelor thesis describes the process of evaluation of geometric specifications. The goal of this work is to compare the evaluation of geometrical tolerances according to ISO and ASME standards and their applications in GOM Inspect software.

Key words: optical digitization, geometric tolerances, GPS, GOM.



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VEIK, M. *Vyhodnocování geometrických tolerancí pomocí 3D optické digitalizace*.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 59 s.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D..





PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Tomáši Kouteckému, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné vedení při vypracování bakalářské práce, za cenné rady a připomínky.

Matouš Veik

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Tomáše Kouteckého, Ph.D., jím poskytnutých užitečných rad a připomínek a za použití literatury, kterou uvádím v seznamu.

V Brně dne

.....

Podpis

OBSAH

1	Úvod	12
2	Analýza problému a cíl práce	13
3	Přehled současného stavu poznání	14
3.1	Optická digitalizace	14
3.2	Normy na hodnocení optických systémů s krátkým rozsahem.....	14
3.2.1	Nejčastěji využívané směrnice	15
3.2.2	Další směrnice	16
3.3	Vyhodnocování geometrických tolerancí dle GPS.....	16
3.3.1	Co je to GPS?	16
3.3.2	Přehled ISO norem vztahujících se k aplikaci a vyhodnocení geometrických tolerancí	17
3.3.3	Model geometrické specifikace	23
3.3.4	Základny a soustava základen	34
3.4	Rozdíly ve vyhodnocování geometrických tolerancí dle norem ISO 1101 a ASME Y14.5	36
3.4.1	Příklad přidružení válce (dle ASME Y14.5)	36
3.5	Rozdíly v aplikaci geometrických tolerancí v ISO a ASME normách	37
3.6	Postup vyhodnocování v softwaru GOM Inspect	38
4	Diskuze	42
4.1	Praktická část	42
5	Závěr	54
6	Seznam použitých zdrojů	55
7	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	58
8	Seznam tabulek a obrázků	59

1 ÚVOD

3D optická digitalizace představuje poměrně nový trend, který však stále získává na dynamičnosti. V souvislosti s nástupem výkonnějších výpočetních zařízení zaznamenal tento obor velmi významný technický pokrok. První 3D skenery byly použity pro komerční využití na konci 20. století. V tomto období vznikly v Německu tři firmy (Steinbichler - 1987, Breuckmann - 1989 a GOM - 1990), jež uvedly do praxe tato zařízení dříve využívané pouze k laboratorním účelům. Přestože se v současné době věnuje výrobě 3D skenerů větší počet firem, lze označit výše uvedené německé společnosti, díky jejich technologickému náskoku, za lídry oboru. [1]

Spotřebitelé jsou čím dál více důmyslní, mají větší přehled, více znalostí a jsou lépe informovaní. Pokud chce firma obstát v konkurenčním boji, musí pružně reagovat na požadavky stále náročnějších zákazníků, analyzovat konkurenční prostředí trhu a udržovat krok s technologickým vývojem. S rostoucími nároky na přesnost výrobků se úměrně zvyšují také nároky na normalizaci výroby. Pro každý prvek je nutné vymezit jejich jmenovitou velikost i úchytky pro dodržení jejich tvaru a dalších vlastností v předepsaných tolerancích. [2] V rámci vyhodnocování geometrických specifikací jsou v praxi nejčastěji aplikovány normy ISO 1101 a ASME Y14.5.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

Optické skenery se čím dál více používají především z důvodu univerzálnosti použití, rychlosti měření, velkému množství naměřených dat a dobré přesnosti. S rychlým nástupem na trh ale souvisí i potřeba standardů zabývajících se právě normalizováním optických metod skenování. Například vyhodnocování tolerancí pomocí dotykových senzorů se už v průmyslu používá delší dobu a existuje pro něj množství standardů, toto ale neplatí pro optickou digitalizaci. Další řešenou oblastí jsou normy pro aplikaci rozměrových a geometrických tolerancí. S postupným zvyšováním složitosti součástí se zvyšuje i složitost tolerování. V důsledku toho se normy neustále vyvíjí, případně vznikají nové a je třeba jim porozumět. V neposlední řadě je věnována pozornost porozumění rozdílu ve vyhodnocování tolerancí dle ISO a ASME s využitím softwaru GOM Inspect. Uživatel by měl rozumět principům, které jsou využívány pro práci s daty, protože v opačném případě může dojít k nesprávnému vyhodnocení tolerancí.

Hlavním cílem práce je analyzovat rozdíl v aplikaci norem ISO 1101 a ASME Y14.5 v softwaru GOM Inspect pro vyhodnocení geometrických tolerancí na základě 3D modelu součásti získaného pomocí 3D optické digitalizace. Dílčími cíli je zpracování přehledu ISO norem vztahujících se k aplikaci a vyhodnocení geometrických tolerancí, analýza rozdílů v aplikaci geometrických tolerancí v ISO a ASME normách, na zvoleném typu geometrické tolerance analyzovat jeho aplikaci v softwaru GOM Inspect a na zvoleném prvku testovacího dílu zhodnotit aplikaci geometrické tolerance zvoleného typu s využitím norem ISO a ASME.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Optická digitalizace

Digitalizace je proces, při němž se fyzický objekt převádí do digitální podoby, jedná se tedy o 3D skenování. Nejčastěji se používá pro vytváření 3D modelů nebo pro účely inspekce, to znamená pro kontrolu rozměrů či geometrie vůči teoretickému (ideálnímu) CAD (computer aided design) modelu. Tato práce se zabývá získáváním modelů pro inspekci s využitím optických 3D skenerů. Tyto skenery se řadí mezi bezkontaktní, což znamená, že není třeba žádné mechanické sondy pro získání dat. Díky tomu je skenování mnohem rychlejší než při použití dotykových zařízení. Při skenování se využívá viditelné světlo, většinou modré barvy. Tato barva se používá především kvůli snížení negativního vlivu denního světla. Na povrch objektu je promítán pravidelný vzor, který se podle tvaru povrchu deformuje. Na tomto základě software vypočítá prostorové souřadnice bodů na povrchu měřeného objektu. Skenovaná součást se takto zaznamená z různých poloh. Jednotlivé skeny jsou následně spojeny za pomoci referenčních značek nebo metodou ICP (Iterative closest point), někdy též nazývanou Best-fit. Výstupem skenování je mrak bodů (velké množství bodů reprezentující povrch fyzického objektu), který lze převést do polygonální sítě ve formátu STL. [1, 3, 4]

Měření pomocí optických skenerů se v dnešní době hojně využívá pro inspekci prototypů či dílů ze sériové výroby atp. Kvalitní skenery dokáží měřit s přesností na tisíce milimetru a proto se dají bez problémů využívat pro vyhodnocování geometrických tolerancí s přesností na 2 desetinná místa.

Existují tři hlavní skupiny optického měření vzdálenosti používané v komerčních systémech. Tyto skupiny se liší rozsahem měření a typem aplikace.

- Nano/mikro rozsah (< 10 mm)
- Krátký rozsah (10 mm až 2 m)
- Střední rozsah (> 2 m)

Pro vyhodnocování geometrických tolerancí se používají systémy ze skupiny s krátkým rozsahem. [5]

3.2 Normy na hodnocení optických systémů s krátkým rozsahem

Kvalitu 3D skeneru lze posuzovat podle čísla udávajícího rozlišení kamery, více pixelů však neznamená automaticky přesnější měření. Z tohoto důvodu je důležité hodnotit přesnost, opakovatelnost a další parametry těchto zařízení. Dosud neexistuje žádná mezinárodní norma, která by předepisovala postup a parametry kontroly samostatných optických zařízení (slovy „samostatných“ jsou myšleny optické systémy, které nejsou kombinované s jinými zařízeními). Níže uvedené směrnice se v praxi hojně využívají, ale jelikož se nejedná o normy, nedosahují takové právní síly a nemají stejnou platnost jako například normy ISO. [1, 5, 6]

V roce 1996 vznikly dvě pracovní skupiny, jedna z Německé společnosti pro fotogrammetrii a dálkové snímání (DGPF) a druhá z Německé společnosti pro měření a automatické řízení (VDI / VDE-GMA), které vyvinuly soubor pokynů pro přijímání a ověřování optických trojrozměrných měřících systémů. Tato průkopnická práce skončila v roce 2002 v části VDI / VDE 2634 Část 1. V roce 2004 zahájila Mezinárodní Asociace Výrobců CMM (CMM - coordinate measuring machines - souřadnicové měřící stroje) projekt s názvem OSIS (Optical Sensor Interface Standard) s cílem vytvořit standard společného rozhraní pro CMM. Standard je členěn do tří pracovních skupin (working group - WG) zabývajících se různými aspekty integrace optických senzorů.

- WG1 - Mechanické / elektrické rozhraní
- WG2 - Integrace dat
- WG3 - Specifikace, klasifikace a ověřování funkce optických snímačů vzdálenosti.

Norma WG3 vznikla v roce 2006 ve spolupráci VDI a OSIS, ISO / TC 213 „Dimensional and geometrical product specifications and verification“ a od té doby se rozmohla jejich spolupráce s různými směrnici v rámci ISO 10360 pro CMM. [5]

3.2.1 Nejčastěji využívané směrnice

3.2.1

Níže uvedené směrnice se zabývají posuzováním přesnosti měřících strojů, zejména chybami snímání (například tvaru nebo velikosti), chybami rozteče koulí a chybami měření rovinnosti či délky a podobně. [5]

- VDI/VDE 2617 Část 6.2 (2005) - Směrnice pro aplikaci normy ISO 10360 pro souřadnicové měřící stroje CMM s optickými snímači vzdálenosti
- VDI/VDE 2634 Část 1 (2002) - Optické trojrozměrné měřící systémy: Zobrazovací systémy s point-by-point snímáním
- VDI/VDE 2634 Část 2 (2012) - Optické trojrozměrné měřící systémy: Optické systémy založené na plošném skenování
- VDI/VDE 2634 Část 3 (2008) - Optické trojrozměrné měřící systémy: Optické systémy založené na skenování oblastí v několika samostatných snímcích [5 ,6]

Části VDI / VDE 2634 1-3 se řídí směnicí VDI / VDE 2617, ale liší se od CMM tak, že tyto směrnice platí pro mobilní optické 3D měřící systémy. Části 2 a 3 jsou důležité pro výrobce a uživatele optických trojrozměrných systémů, protože ověřují shodu systému se specifikacemi. Toto ověřování se provádí pomocí testů prováděných jak výrobcem, tak uživateli. Pro posouzení nesouladu se specifikacemi je třeba použít normy ISO 14253-1 a ISO 23165, které poskytují pokyny pro odhad nepřesnosti testu. [5]

ISO / TC 213 zveřejnila normu ISO 10360-8: 2013, která obsahuje testování souřadnicových měřicích strojů CMM s optickými snímači vzdálenosti. Optické snímače vzdálenosti zahrnují jak snímače pro měření jednoho bodu, tak snímače pro měření plochy. [5, 6, 7]

3.2.2 Další směrnice

Také několik dalších organizací se podílelo na tvorbě dokumentů týkajících se 3D zobrazovacích systémů. Zejména výbor ASME B89.4 - Coordinate Measuring Technology měl projektový tým 4.14 zabývající se bezkontaktními snímacími sondami. Jejich práce byla sloučena do B89.4.11 - Probes and Probe Changers.

Německá norma DIN 32877: 2000-086 se týká optoelektronického měření vzdálenosti, profilu a tvaru. [5]

ASTM (American Society for Testing and Materials) Výbor E57 na 3D Zobrazovací systémy vznikl v roce 2006. Tento výbor řeší problémy související s 3D zobrazovacími systémy jako například laserové snímače a nebo kamery s optickým rozsahem. Výbor publikoval své standardy v knize Annual Book of ASTM Standards, Volume 10. [6, 8]

3.3 Vyhodnocování geometrických tolerancí dle GPS

V dnešní době je snaha o předepisování plně tolerovaných výkresů technické dokumentace velice důležitá. Plně tolerované znamená, že geometrie (tvaru, směru, polohy a házení) výrobku je zcela definována a tolerována tak, aby nebylo možné ponechat jakoukoliv úpravu na výrobcu, případně dělníkovi či kontrolorovi. Technický vývoj je dynamický a nepřetržitý proces, a proto je nutné vyvíjet i normalizaci popisující například výrobu, kontrolu, pojmy a postupy. [9]

3.3.1 Co je to GPS?

Geometrická specifikace produktu (GPS – Geometrical Product Specifications) je mezinárodní jazyk, který využívá různých symbolů k vyjádření tolerancí v technických výkresech. GPS definuje jmenovitou geometrii, rozměry a stav povrchu výrobku (produktu) pro určení a následně i ověření tolerancí. Ty kvantifikují možné odchylky od této jmenovité geometrie (rozměru, stavu povrchu) výrobku tak, aby splňoval svou funkci, ke které byl navržen. ISO má za cíl matematicky přesně definovat specifikace. Za tímto účelem byla sestavena komise ISO TC 213 „Dimensional and geometrical product specifications and verification“, která se zabývá vývojem řady ISO-GPS norem. Systém ISO-GPS norem je efektivní komunikační spojení, které umožňuje, že je výkresová dokumentace pochopena ve všech zemích naprosto stejně. [10, 11, 12]

3.3.2 Přehled ISO norem vztahujících se k aplikaci a vyhodnocení geometrických tolerancí

3.3.2

Jak bylo zmíněno již v kapitole 3.3.1 GPS je soubor norem vztahujících se ke geometrii, rozměrům a stavu povrchu produktu. Kapitola (a zároveň celá bakalářská práce) se však věnuje geometrickým tolerancím, proto se normami ohledně rozměrů a stavu povrchu nebudeme zabývat. Cílem není vypsát kompletní seznam norem na výše uvedené téma, ale uvést ty nejdůležitější z nich, nastínit jejich vzájemnou provázanost a následně pak porovnat s normami ASME.

▪ Rozsah použití a vztahy mezi normami ISO GPS

Přehled o struktuře systému ISO GPS poskytuje mezinárodní norma ISO 14638:2015, která se řadí mezi základní ISO GPS normy. Norma (tak, jako i spousta dalších ČSN norem) obsahuje pouze anglický originál.

Všeobecně lze normy ISO GPS rozdělit do těchto tří typů: [13, 14]

▪ Základní normy (fundamental standards)

Tyto standardy definují pravidla a zásady vztahující se na všechny kategorie a všechny řetězce v matici ISO GPS.

▪ Všeobecné normy (general standards)

Všeobecné normy se aplikují na jednu nebo více kategorií či řetězců, ale nejsou fundamentální. Tyto standardy jsou nejširší skupinou norem ISO GPS. Stanovují předepisování specifikací ve výkresech nebo různé výrobní či měřicí postupy.

▪ Doplnkové normy (complementary standards)

Tyto standardy stanovují doplňující pravidla pro konkrétní výrobní proces nebo pro konkrétní strojní prvky.

Norma ISO 14638:2015 uvádí pouze tyto tři typy. Ve starších verzích byl uváděn ještě další typ, a to „globální normy“. Tento typ byl z normy odstraněn a normy, které byly dříve označeny jako globální, jsou od roku 2015 zařazeny do základních nebo do všeobecných standardů. Z toho důvodu se u norem, které jsou vydané dříve než v roce 2015, může v jejich úvodu objevit zařazení do globálních standardů. [13]

Jak bylo zmíněno již dříve, ISO GPS se zabývá geometrickými vlastnostmi výrobku. Rozlišuje se těchto devět geometrických vlastností: [13]

- velikost (size),
- vzdálenost (distance),
- tvar (form),
- orientace (orientation),
- poloha (location),
- házení (run-out),
- profilová textura povrchu (profile surface texture),
- plošná textura povrchu (areal surface texture) a
- nedokonalosti povrchu (surface imperfections).

Každá z těchto vlastností tvoří specifickou „kategorii geometrických vlastností“ a jednotlivé kategorie lze dále dělit na řetězce norem. Řetězec norem je souhrn několika posobě jdoucích norem, které se zabývají všemi fázemi výroby součásti od zadání požadavku na výkres přes výrobu až po vyhodnocování. Řetězec norem může být například velikost válce, velikost kužele, nebo velikost koule. Každý z těchto řetězců norem lze rozdělit do článků řetězce, kde jeden článek řetězce zastupuje jednu fázi v procesu výroby součásti. Jednotlivé články řetězce jsou označeny písmeny z abecedy (první článek řetězce tedy nese označení A, druhý B atd.) a popisem. V současnosti norma rozlišuje 7 článků řetězců, a to: [146, pej]

- Článek řetězce A – Symboly a znaky (Symbols and indications)
- Článek řetězce B – Požadavky na prvky (Feature requirements)
- Článek řetězce C – Vlastnosti prvků (Feature properties)
- Článek řetězce D – Shoda a neshoda (Conformance and non-conformance)
- Článek řetězce E – Měření (Measurement)
- Článek řetězce F – Měřicí vybavení (Measurement equipment)
- Článek řetězce G – Kalibrace (Calibration)

Standards, kategorie a články řetězce norem jsou uspořádány do matice, díky čemuž je možné jasně uvést rozsah použití jednotlivých standardů a vztahů mezi nimi. Rozsah každého ISO GPS standardu lze ilustrovat v matici znázorňující, pro které články řetězce (sloupce) a pro které geometrické kategorie (řádky) se norma aplikuje. Pro příklad je znázorněna norma ISO 1101 v Maticovém modelu viz tabulka 1, kde norma ovlivňuje pole označená hvězdičkou *. [13]

Tabulka 1 ISO GPS Maticový model [13]

	Články řetězce						
	A	B	C	D	E	F	G
Velikost							
Vzdálenost							
Tvar	*	*	*				
Orientace	*	*	*				
Poloha	*	*	*				
Házení	*	*	*				
Profilová textura povrchu							
Plošná textura povrchu							
Nedokonalosti povrchu							

▪ Přehled ČSN EN ISO GPS norem

Jak bylo zmíněno výše, cílem není vypsát kompletní seznam norem vztahujících se k aplikaci geometrických tolerancí, ale uvést ty nejdůležitější z nich. Oblast ČSN ISO GPS norem se nachází v třídě 1 a to zejména v podtřídách 0131 – Technické výkresy, 0141 – Nejistoty měření, 0142 – Tolerance a uložení hladkých součástí, 0144 – Tolerance tvaru a polohy, geometrie povrchu. [15]

▪ Třída 0131 – Technické výkresy [15, 16]

▪ ČSN EN ISO 3040:2016 (013135)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Kótování a tolerování - Kužele

Jedná se o všeobecnou normu, která ovlivňuje články řetězce A a B řetězců norem týkající se velikosti, tvaru, orientace, polohy a házení.

▪ ČSN EN ISO 1660:2017 (013139)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerance - Tolerování profilu

Norma se považuje za všeobecnou normu a ovlivňuje články řetězce A, B a C řetězců norem týkající se tvaru, orientace a polohy.

▪ Třída 0141 – Nejistoty měření [15, 16]

▪ ČSN EN ISO 17450 (014103)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Obecné pojmy - Část: 1, 2, 3

ISO 17450 je základní norma. Věnuje se modelu geometrické specifikace a jeho ověřování, definuje a popisuje odborné výrazy geometrických prvků výrobku.

- ČSN EN ISO 14638:2015 (014104)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Maticový model

ČSN EN ISO 14638 se řadí mezi základní normy. Ujasňuje koncepci ISO GPS norem a vystihuje to, jak současné a budoucí normy ISO GPS odpovídají požadavkům systému ISO GPS. Dokument ilustruje rozsah různých standardů a to, jak spolu souvisí.

- ČSN EN ISO 14978:2006 (014105)

Geometrické specifikace výrobků (GPS) - Všeobecné pojmy a požadavky na měřicí vybavení pro GPS

Jde o globální normu, která se věnuje pravidlům a požadavkům pro jednoduchá měřidla jako například posuvná měřidla, koncové měřky, mikrometry apod.

- ČSN EN ISO 1:2016 (014110)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Referenční teplota pro specifikace geometrických a rozměrových vlastností

ISO 1 je považována za základní normu. Definiuje pojmy referenční teploty a určuje standardní referenční hodnotu teploty pro specifikaci geometrických a rozměrových vlastností objektu.

- ČSN EN ISO 14405 (014115)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 1, 2, 3

ČSN EN ISO 14405 patří do skupiny všeobecných norem a ovlivňuje články řetězce A, B a C řetězce norem týkající se velikosti. Standard líčí použití geometrického tolerování rozměrů lineárních, nelineárních a úhlových.

- ČSN EN ISO 1101:2017 (014120)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení

Jedná se o všeobecnou normu, jež ovlivňuje články řetězce norem A, B a C řetězců norem týkající se tvaru, orientace, polohy a házení. Představuje počáteční základ pro geometrické tolerování. Definiuje symbolový jazyk pro geometrické specifikace obrobků a předpisy pro jeho výklad.

- ČSN EN ISO 14660 (014121)

Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Geometrické prvky - Část 1, 2

Norma ISO 14660 se považuje za všeobecnou normu. Obsahuje pojmy pro geometrické prvky a jejich význam. Určuje zjištěné (naměřené nebo jinak získané) skutečné prvky jako například zjištěná střední čára válce a kužele nebo zjištěná střední plocha.

- ČSN EN ISO 14406:2010 (014122)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Extrakt

Daná norma je normou všeobecnou a ovlivňuje články řetězce C a E všech kategorií. Definiuje termíny používané pro extrakty geometrické specifikace výrobků a popisuje operace s extrakty.

- ČSN EN ISO 2692:2014 (014123)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Požadavek maxima materiálu (MMR), požadavek minima materiálu (LMR) a požadavek reciprocity (RPR)

Tato všeobecná norma a ovlivňuje články řetězce A, B a C řetězců norem týkající se velikosti, tvaru, orientace a polohy.

- ČSN EN ISO 25378:2011 (014124)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Charakteristiky a podmínky - Definice
Řadí se do skupiny základních norem. Dále rozšiřuje a matematicky popisuje geometrické specifikace na základě norem ISO 17450-1 a ISO 22432.

- Normy ČSN EN ISO 12780 (014140), ČSN EN ISO 12781 (014146), ČSN EN ISO 12181 (014151), ČSN EN ISO 12180 (014156)

Jedná se o všeobecné normy a ovlivňují článek řetězce B řetězce norem týkající se tvaru. Tyto normy určují a popisují výrazy používané u přímosti (12780), rovinnosti (12781), kruhovitosti (12181) a válcovitosti (12180) integrálních (skutečných) prvků.

▪ **Třída 0142 – Tolerance a uložení hladkých součástí** [15, 16]

- ČSN EN ISO 8015 (014204)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Základy - Pojmy, principy a pravidla
Jedná se o základní normu ISO GPS a pokrývá řadu základních principů, pojmů a pravidel, které se vztahují na všechny standardy GPS.

▪ **Třída 0144 – Tolerance tvaru a polohy, geometrie povrchu** [15, 16]

- ČSN EN ISO 5459:2011 (014402)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Základny a soustavy základen

Tato norma ovlivňuje články řetězce A, B a C. shrnuje základní termíny, které se při aplikování základen užívají. Dále pak vysvětluje pravidla a postupy používání základen a systémů základen.

- ČSN ISO 2768-2 (014406)

Všeobecné tolerance. Část 2: Nepředepsané geometrické tolerance

Toto je všeobecná norma a ovlivňuje články řetězce A, B a C řetězců norem týkající se velikosti, tvaru, orientace a polohy. Norma předepisuje geometrické tolerance prvků, které nejsou předepsány na výkrese.

- Normy ČSN ISO 4291:1985 (014411) a ČSN ISO 4292:1994 (014412)

Obsahem těchto norem je popis metod pro měření úchylek kruhovitosti, při měření změn poloměru (4291) a při dvoubodovém a tříbodovém měření (4292).

- ČSN EN ISO 5458:1998 (014441)

Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerování polohy

Toto je všeobecná norma a ovlivňuje články řetězce A a B řetězce norem týkající se polohy.

- ČSN EN ISO 16610 (014445)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Filtrace - Část 1, 20, 22, 28, 29, 30, 31, 40, 41, 49, 60, 61, 71, 85 a ČSN ISO 16610-21

Toto je všeobecná norma a ovlivňuje články řetězce C a F. Normy se zabývají základy, terminologií a různými typy GPS filtrací.

- ČSN EN ISO 22432:2011 (014452)

Geometrické specifikace produktu (GPS) - Prvky použité ve specifikaci a ověřování

Toto je všeobecná norma a ovlivňuje všechny řetězce norem. Dále rozvíjí a specifikuje definice geometrických prvků z normy ISO/TS 17450-1.

- ČSN EN ISO 8062 (014460) - Části 1, 3 a ČSN P CEN ISO/TS 8062-2 (014460)

Geometrické specifikace produktů (GPS) - Rozměrové a geometrické tolerance tvarovaných součástí

Toto jsou doplňkové normy a ovlivňují články řetězce A a B norem na odlitky. Dokumenty předepisují tolerování rozměrů a geometrie a požadované přídavky na obrábění všech typů tvarových součástí (přičemž se nejvíce věnují odlitkům).

- **Normy ASME [17]**

Na rozdíl od mezinárodních norem mají ASME standardy mnohem menší počet dílčích standardů. Základní normou je ASME Y14.5-2009, která je řídicí normou pro ostatní. Tento dokument je vyvíjen podvýborem 5 výboru pro standardy ASME „Y14 Engineering Product Definition and Related Documentation Practices”.

Tento dokument je pak podporován dalšími:

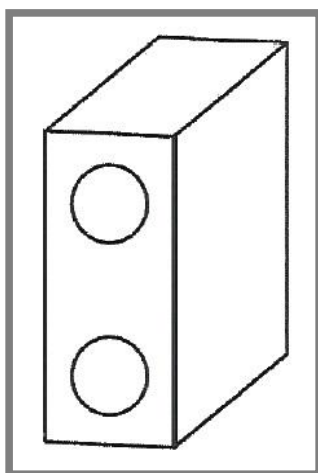
- Y14.5.1 Mathematical Definition of Y14.5 Dimensioning & Tolerancing Principles
- Y14.8 Castings, Forgings, & Molded Parts
- Y14.41 Digital Product Definition Data Practices
- Y14.43 Dimensioning and Tolerancing Principles for Gages and Fixtures

Dalším standardem, který je zatím ve vývoji, je Y14.45 Measurement Data Reporting Practices.

3.3.3 Model geometrické specifikace

V této kapitole jsou uvedeny definice, charakteristiky a specifikace obrobků, modelů nebo jednotlivých prvků, které jsou důležité pro vyhodnocování tolerancí, respektive geometrických specifikací. Většina těchto pojmů je definována v normách ČSN EN ISO 17450-1 a ČSN EN ISO 22432. Norma definuje geometrickou specifikaci takto: „Geometrická specifikace je konstrukční krok, kde pole dovolených úchylek souboru charakteristik obrobku je určeno funkčními potřebami obrobku. Toto je předpokladem stanovení úrovně kvality ve shodě s výrobními procesy, mezi dovolených pro výrobu a stanovení shody obrobku.“ [14] Jinými slovy definuje geometrickou specifikaci jako kvalitativní stav jednoho nebo více geometrických prvků. Tyto prvky se získají aplikováním různých operací (jako třeba rozdělení, extrakce, filtrace nebo přiřazení) z neideálního modelu povrchu, což je model fyzického rozhraní mezi obrobkem a okolním prostředím. Neideální model povrchu bude podrobněji vysvětlen níže. [18, 19]

Na začátku procesu vyhodnocování je zapotřebí vytvořit model obrobku určitého tvaru, který se nazývá „jmenovitý model“ (viz obrázek 1). Je navržen tak, aby splňoval funkční požadavky. Jmenovité modely mají ideální tvar i rozměry, a používají se denně v CAD systémech k reprezentování dílů či sestav. Výrobek s takovými vlastnostmi samozřejmě není možné vyrobit nebo kontrolovat, navíc na tomto modelu nejsou dobře zohledněny geometrické odchylky. [18, 20]



Obrázek 1 Jmenovitý model [18]

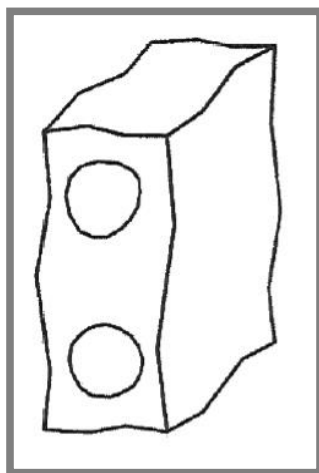
Popis těchto odchylek se v současnosti řeší tak, že konstruktér vytvoří další model obrobku, který má neideální geometrii s odchylkami od ideální geometrie. Pro tyto odchylky však musí platit, že model bude stále schopen plnit svou funkci. Tento model se nazývá „neideální model povrchu“ a v zahraniční literatuře je označován jako „skin model“. [18]

V praxi se často používá termín skin model i v českém jazyce, protože jde o relativně nový termín a neexistuje mnoho publikací na toto téma v češtině. Je tedy nutné čerpat ze zahraničních zdrojů a tím pádem nemá překládání tohoto termínu tak velký význam.

CAD model je definován konečným počtem parametrů: souřadnice bodu, úhly, délky atd. Naproti tomu popsatelnost skin modelu je nekonečná, jinými slovy, skin model je definovaný nekonečným množstvím parametrů. Díky neomezenému popisu se mohou vzít v úvahu všechny druhy geometrických variací. Skin model je obecně představován jako kontinuální (spojitý) povrch, přičemž defekty tvaru jsou zvažovány v různých měřítkách pozorování: makro, mikro a nano stupnice. Modely zahrnují geometrické vady jako jsou odchylky v orientaci, poloze a rozměrech a vady struktury, které nelze přesně popsat. [19, 20, 21]

V souhrnu, skin model je koncepční nástroj užitečný pro všechny osoby, které se podílejí na konstrukčním návrhu, výrobě a kontrole, aby si představili přípustné odchylky tvaru dílu vzhledem k geometrickým specifikacím. [21]

Jak bylo zmíněno již dříve, neomezený popis je nutný, aby bylo možné zvážit všechny geometrické odchylky v makro až nano měřítku pozorování, ale protože je popis nekonečný, neexistuje žádná možnost simulace skin modelu v počítačích nebo v jiných médiích, neboť teoretický povrch obrobku obsahuje nekonečný počet bodů. Skin model je čistě abstraktní, tudíž si ho lze jen představit. [19, 21] Skin model na obrázku 2 slouží pouze k ilustrativním účelům.



Obrázek 2 Neideální model povrchu [18]

Vzhledem k tomu, že samotný skin model je nekonečným modelem, pro reprezentaci skin modelu a jeho zpracování pomocí počítačem podporovaných nástrojů je třeba převedení skin modelu do konečného modelu. Proto se generují skin model shapes. Na úrovni pojmů koncept skin model shapes není spojen se schématem reprezentace geometrie pomocí počítačů, jako je například parametrický nebo diskrétní. [19, 20]

Nicméně schémata diskrétní reprezentace, jako jsou bodové mraky a povrchové sítě, byly navrženy pro operacionalizaci¹ konceptu skin model shape. Skin model shape je potom model povrchu reálné součásti tvořený mrakem bodů či povrchovou sítí v digitální podobě. Mraky bodů a povrchové sítě mohou být vytvořeny v průběhu návrhu ze jmenovitého modelu technikami tessellace (tessellation) a nebo jsou

¹ Termín operacionalizace se používá pro vyjádření převodu abstraktních pojmů do konkrétního pozorování daných abstraktních konceptů v reálném světě.

získávají jako výsledek dotykových nebo optických měření během výroby a inspekce. [19, 21]

Jak bylo zmíněno již dříve, skin model shape je poměrně nový termín a dosud není zahrnut v normách. V mezinárodních normách nebo některých člancích je skin model a skin model shapes slučován do jednoho, a to skin model (v češtině neideální model povrchu). V české verzi mezinárodní normy 17450-1 je tedy neideální model povrchu popsán i jako model reprezentující skutečný povrch obrobku (kromě toho, že je to i nekonečný model sloužící k simulaci variací povrchu). V souhrnu, skin modely zohledňují geometrické odchylky, které jsou očekávány, předpovězeny nebo již pozorovány v reálných výrobních procesech. [20]

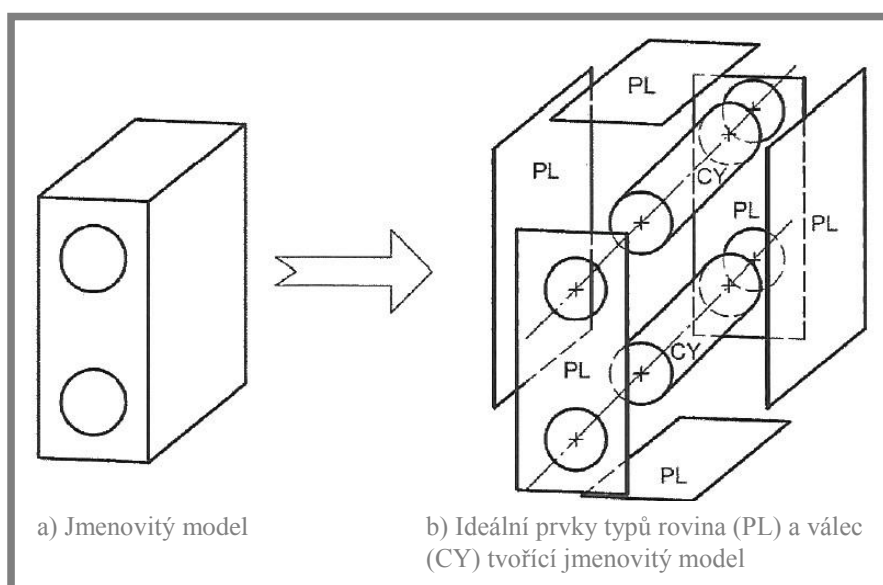
V následujících podkapitolách Prvky a Charakteristiky budou vysvětleny pojmy důležité pro následující operace s modely. Tyto operace lze aplikovat na jmenovitý model i neideální model.

▪ Prvky

Prvkem se stává bod, přímka, povrch nebo objem. Prvky mohou být ideální či neideální.

▪ Ideální prvky

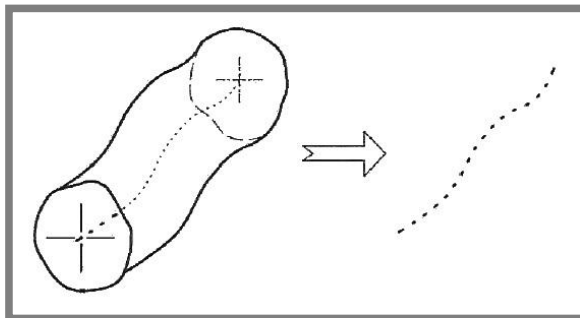
Ideální prvek může být definován typem (jako například rovina, válec, kužel, koule nebo prstavec) a vlastní charakteristikou (rozměrem - viz následující kapitola charakteristiky). Ideální prvky, které se používají k sestavení ideálního modelu nezávisle na neideálním modelu povrchu se nazývají „jmenovité prvky“, „přidružené prvky“ je označení pro prvky závislé na neideálním modelu povrchu. Na obrázku 3 je znázorněno sestavení jmenovitého modelu ze dvou různých typů ideálních prvků. Velikosti, orientace a umístění prvků jsou určeny charakteristikami (pojem charakteristika bude vysvětlen níže v podkapitole „charakteristiky“).



Obrázek 3 Sestavení jmenovitého modelu [18]

- Neideální prvky

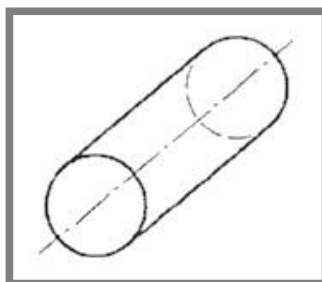
Neideální prvky jsou složeny z nekonečného či konečného počtu bodů, přičemž jsou zcela závislé na neideálním modelu povrchu a mohou být samotnými neideálními modely povrchu (viz obrázek 2) nebo získány pomocí nějakého procesu (odvozením prostřednictvím „operace“) viz obrázek 4, vyjmutím části neideálního modelu povrchu (viz obrázek 7) a podobně.



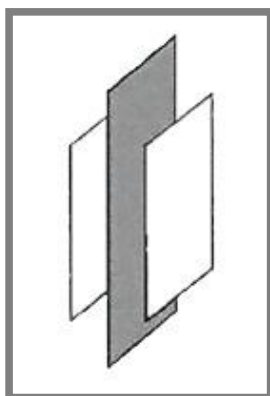
Obrázek 4 Odvozená část prvku [18]

- Situační prvky

Situační prvek je „bod, přímka, rovina nebo šroubovice, ze které může být stanoveno umístění a/nebo orientace geometrického prvku“ [18]. Na obrázcích 5 a 6 jsou znázorněny příklady situačních prvků. [18]



Obrázek 5 Situační přímka pro válec [18]



Obrázek 6 Situační rovina pro pár rovin [14]

▪ **Charakteristiky**

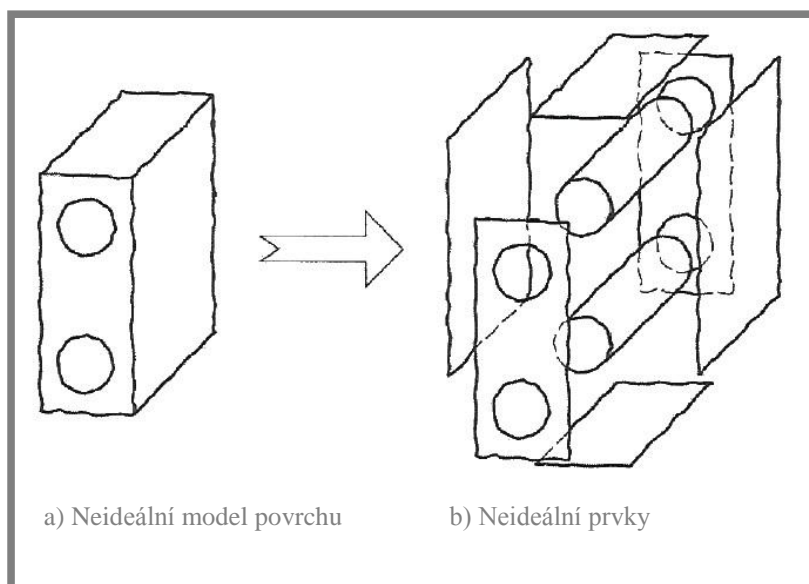
Rozlišujeme „vlastní charakteristiky“ a „situační charakteristiky“. Přičemž vlastní charakteristiky jsou stanoveny na jediném ideálním prvku a situační charakteristiky mezi dvěma ideálními prvky nebo mezi neideálním a ideálním prvkem. Velice zjednodušeně řečeno si pod pojmem „charakteristika“ můžeme představit rozměr, tudíž pro „vlastní charakteristiky“ například průměr, úhel, rozteč nebo délka a pro „situační charakteristiky“ například vzdálenost či úhel. [18]

▪ **Operace prvku**

Pro získání ideálních či neideálních prvků se využívá následujících operací, které lze používat v různém pořadí. Aplikováním vhodných operací lze získat prvky, na kterých se (dle normy ISO 1101) vyhodnocují odchylky od ideálních geometrií.

▪ **Rozdělení**

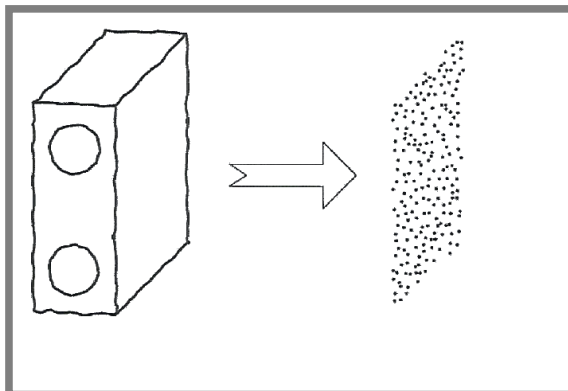
Operace rozdělení se používá k získání neideálních prvků odpovídajících jmenovitým prvkům. Tyto neideální prvky se získají rozdělením neideálního modelu povrchu nebo skutečného povrchu. Jak je vidět na obrázku 7.



Obrázek 7 Rozdělení neideálního modelu povrchu [18]

- Extrakt

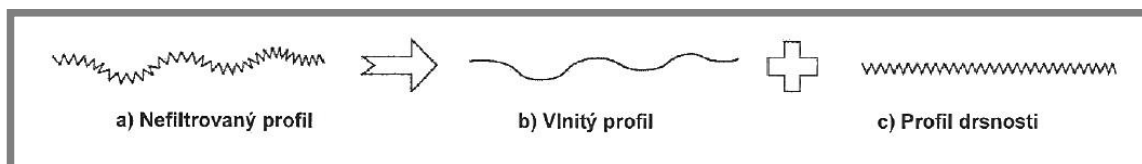
Extrahováním se získá konečný počet bodů z neideálního prvku. Výsledek extrakce je znázorněn na obrázku 8. Konkrétní výsledek extrahování závisí na metodě extrakce.



Obrázek 8 Extrahované body z neideálního prvku neideálního modelu povrchu [18]

- Filtrace

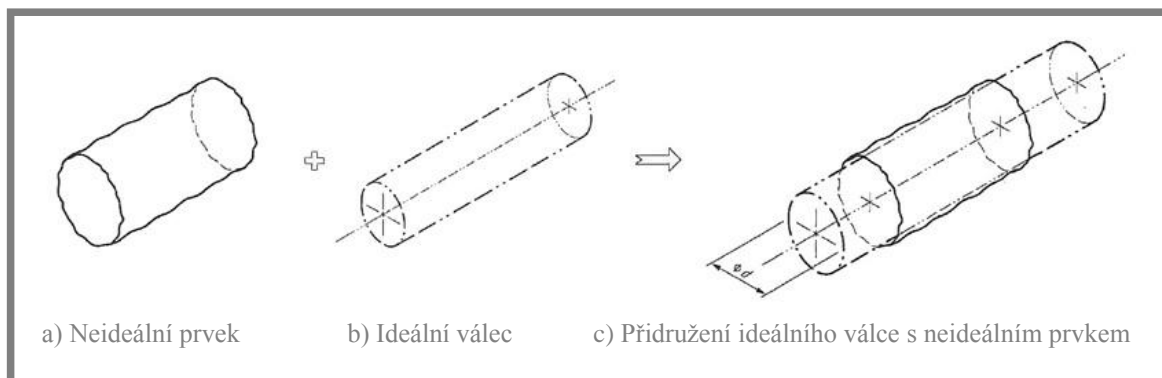
Pomocí filtrace je možné získat jednotlivé profily povrchu (drsnosti, vlnitosti, struktury, tvaru) z neideálního prvku, respektive základního profilu (nebo-li nefiltrovaného profilu). Konkrétní výsledek filtrování závisí na metodě filtrace, kterými mohou být například spline filtry, prostorová interpolace vlnitosti, Gaussovy filtry a Gaussovy regresní filtry, segmentace nebo diskové a horizontální lineární segmentové filtry. Filtrováním a typy filtrování se zabývá mezinárodní norma ČSN EN ISO 16610 (014445). Příklad filtrace je znázorněn na obrázku 9. [15, 18, 22]



Obrázek 9 Příklad oddělení profilu [18]

- Přidružení

Přidružení se používá k přiložení ideálních prvků k neideálním prvkům podle specifikovaného kritéria, například „maximalizovaný průměr vepsaného válce“ (viz obrázek 10).



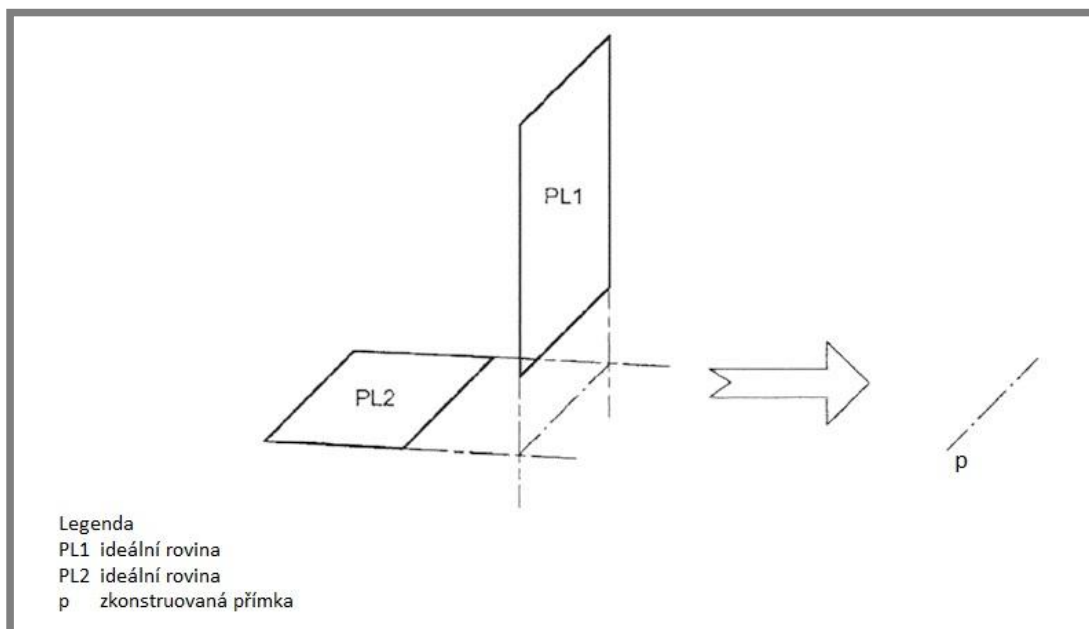
Obrázek 10 Příklad přidružení [18]

- Soubor

Operace soubor se využívá ke shromáždění několika geometrických prvků, které spolu představují funkční roli. Například soubor konečného počtu bodů může představovat křivku a nebo soubor dvou rovinných ploch ležících v jedné rovině může představovat jednu základnu.

- Konstrukce

„Operace prvku nazvaná „konstrukce“ je použita k stavbě ideálních prvků z jiných prvků.“ [18] Jako příklad je na obrázku 11 znázorněna konstrukce přímky pomocí dvou rovin.



Obrázek 11 Příklad konstrukce přímky pomocí průsečíku dvou rovin [18]

▪ **Specifikace**

Specifikace je definování pole dovolených úchylek vztažených na charakteristiku obrobku. Což znamená, že se pomocí specifikací určí dovolené meze charakteristiky obrobku. Specifikovat lze rozměrem nebo zónou. Specifikace rozměrem vymezuje hodnoty vlastní charakteristiky ideálního prvku, popřípadě hodnoty situační charakteristiky mezi ideálními prvky. Specifikace zónou vymezuje dovolené úchytky neideálního prvku uvnitř prostoru, který je omezen ideálním prvkem nebo ideálními prvky.

▪ **Úchylka**

Úchylku je možné stanovit při specifikaci rozměrem nebo zónou.

„V případě specifikace rozměrem, je úchylka buď:

- rozdíl mezi hodnotou vlastní charakteristiky přidruženého prvku a hodnotou vlastní charakteristiky odpovídajícího jmenovitého prvku, nebo
- rozdíl mezi hodnotou situační charakteristiky mezi dvěma přidruženými prvky a hodnotou situační charakteristiky mezi dvěma odpovídajícími jmenovitými prvky.

V případě specifikace zónou je úchylka minimální možná hodnota vlastní charakteristiky ideálního prvku omezeného zónou obsahující neideální prvek.“ [18]

▪ **Ověření**

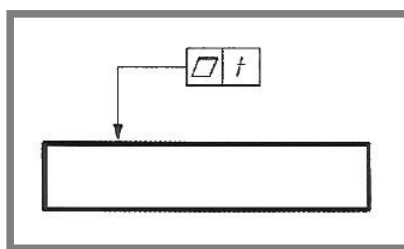
Fakt, že obrobek splňuje specifikace, se dokazuje provedením měření a poté je výsledek měření srovnán se specifikací. V některých případech není nutné znát přesnou hodnotu odchylky, a proto stačí ověření kalibrem.

▪ **Příklady aplikací operací prvků**

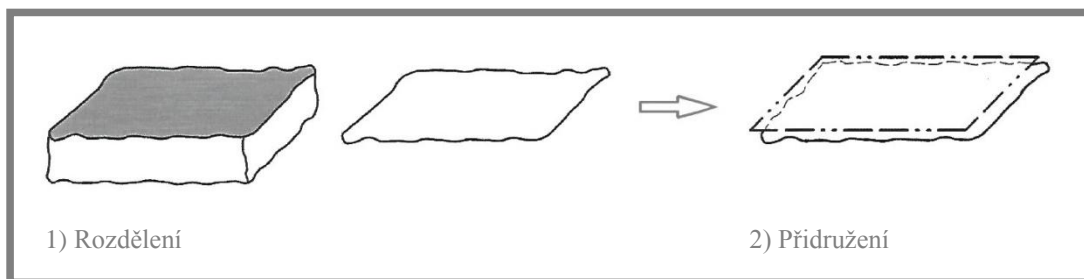
Nyní budou uvedeny příklady aplikací operací prvků pro jasnější pochopení těchto operací a pro znázornění postupu při vyhodnocování tolerance v praxi.

- Příklad pro tolerance tvaru – tolerance rovinnosti (viz obrázek 12)

Nejprve se získá povrch požadované plochy rozdělením neideálního modelu povrchu. Následně je provedena operace přidružení ideálního prvku typu rovina s rozděleným prvkem tak, aby maximální vzdálenost mezi každým bodem rozděleného prvku a situačního prvku roviny byla minimální. Tento postup je znázorněn na obrázku 13.



Obrázek 12 Specifikace rovinnosti [18]



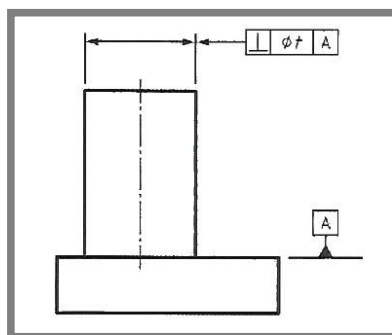
Obrázek 13 Operace prvků - tolerance rovinnosti [18]

Velikost úchytky je získána vyhodnocením charakteristiky, to znamená zjištěním vzdáleností bodů rozděleného prvku od přidružené roviny. Tato maximální vzdálenost musí být menší nebo rovna $t/2$.

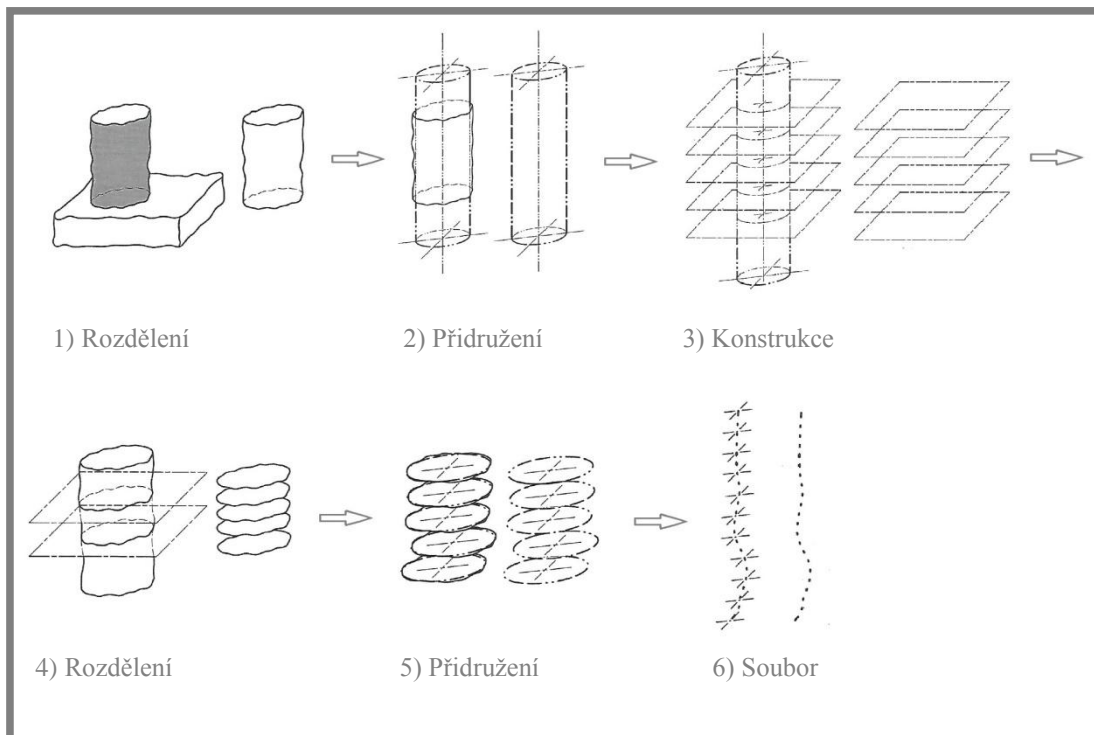
▪ Příklad pro tolerance orientace – tolerance kolmosti (obrázek 14)

U tohoto prvku je pro vyhodnocení tolerance kolmosti potřebné získat osu neideálního válce a také základnu povrchu A, a následně se provede jejich přidružení.

Pro získání osy se provádí operace v následujícím pořadí – rozdělení neideálního povrchu válce z neideálního modelu povrchu, přidružení ideálního prvku typu válec, konstrukce rovin kolmých k ose přidruženého válce, rozdělení neideálních kružnic (pomocí dříve vytvořených rovin), přidružení ideálních prvků typu kružnice a nakonec soubor všech středů ideálních kružnic (aby byly středy brány jako jeden celek). Tento postup je znázorněn na obrázku 15.

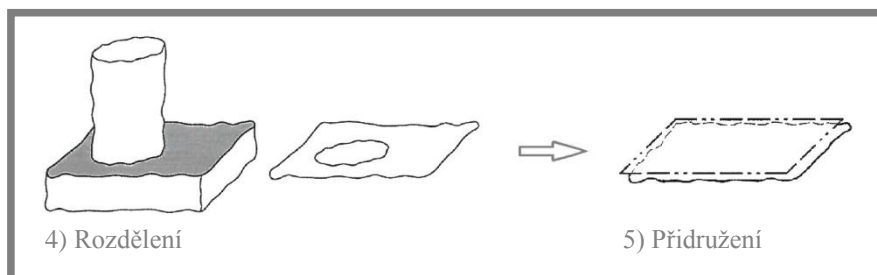


Obrázek 14 Specifikace kolmosti [18]



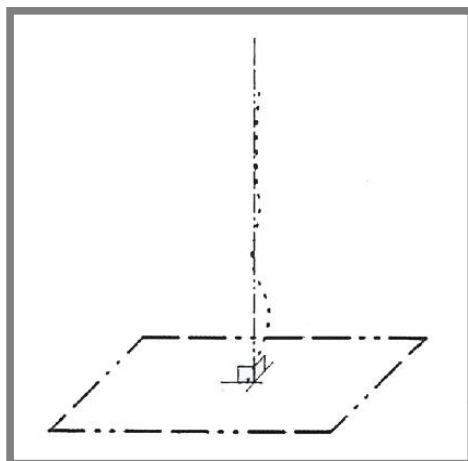
Obrázek 15 Operace prvků - tolerance kolmosti - získání reálné osy [18]

A následně pro získání základny operace v pořadí – rozdělení neideálního povrchu odpovídajícího základně A z neideálního modelu povrchu a přidružení ideálního prvku typu rovina situačního prvku (který je zároveň základnou A). Tento postup je znázorněn na obrázku 16.



Obrázek 16 Operace prvků - tolerance kolmosti - získání základny [18]

Konečným přidružením ideálního prvku typu přímka se souborovým prvkem se získá osa tolerančního intervalu s tím, že situační prvek přímky je kolmý k základně A a maximální vzdálenost mezi každým bodem souboru prvků a přidružené přímky je minimální (viz obrázek 17).



Obrázek 17 Operace prvků - tolerance kolmosti - Přidružení [18]

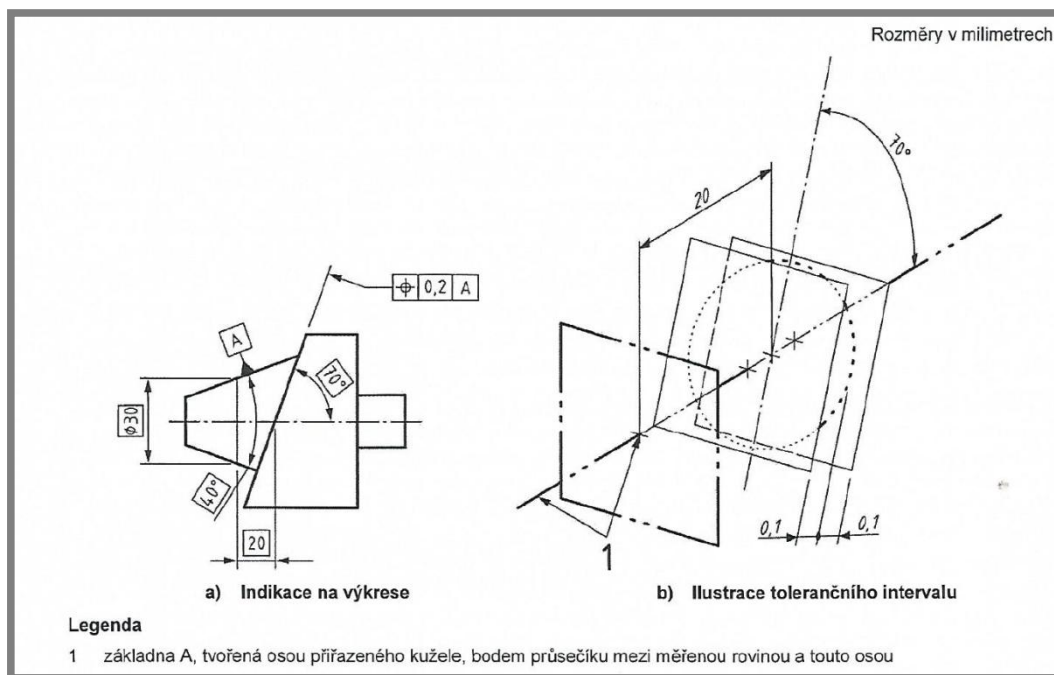
Velikost úchytky je získána vyhodnocením charakteristiky, to znamená zjištěním vzdáleností bodů souborového prvku od osy tolerančního intervalu. Tato maximální vzdálenost musí být menší nebo rovna $t/2$.

3.3.4 Základny a soustava základen

Základny jsou dalším důležitým odvětvím v oblasti vyhodnocování geometrických tolerancí.

Jsou to teoreticky přesné geometrické prvky, které umožňují umístění nebo orientaci tolerančního intervalu. Základny odebírají stupně volnosti tolerančního intervalu, přičemž počet odebraných stupňů volnosti závisí na jmenovitém tvaru prvků, ke kterým jsou základny ustaveny (standardně odebírají všechny stupně volnosti tolerančního intervalu). Základna je definována souborem situačních prvků pro ideální prvek. Tento ideální prvek je přiřazený k základnímu prvku obrobku. Geometrické typy přiřazených prvků mohou být například rovina, válec, šroubovice, kulovitá plocha a jiné. Základní prvek je skutečný (neideální) integrální prvek používaný pro definování (určení) základny. Integrální prvek je povrch nebo čára na povrchu [23, 24]

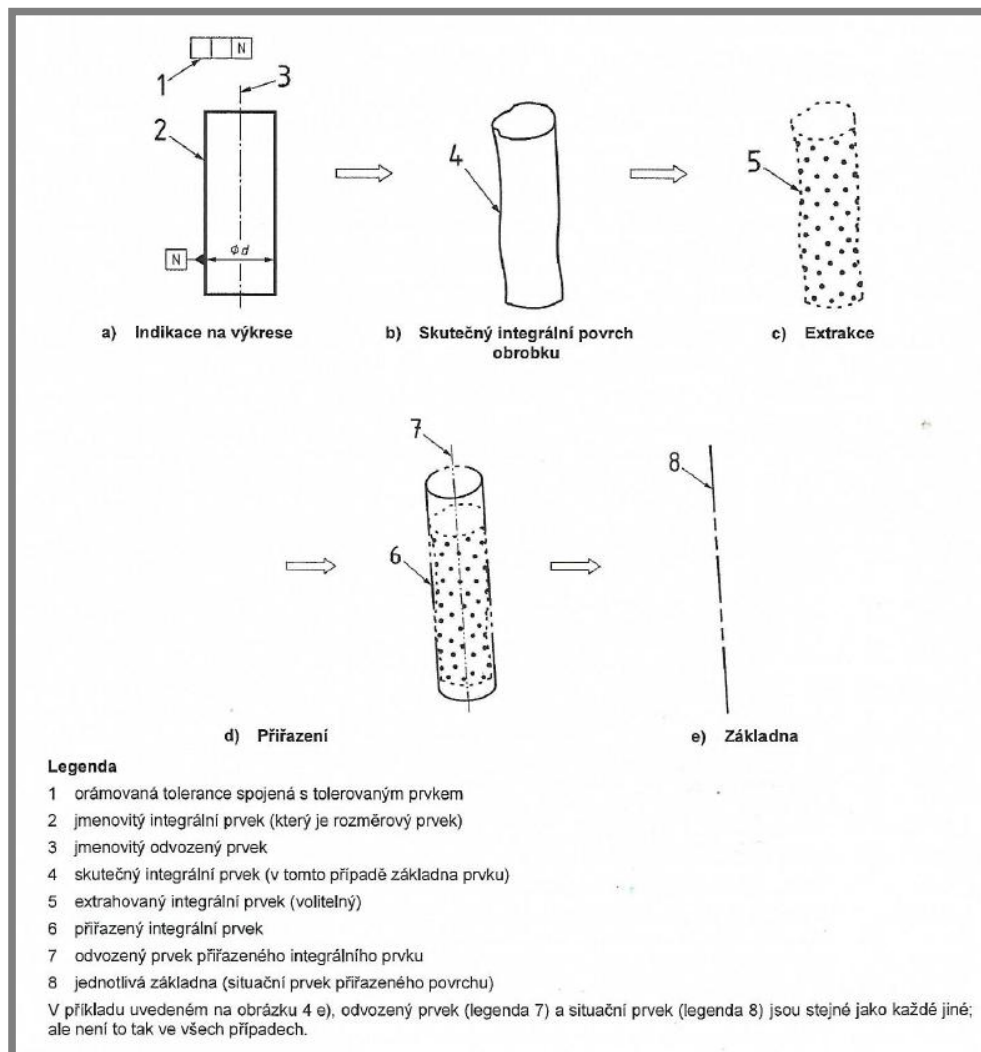
Na obrázku 18 je toleranční pole omezeno v orientaci teoreticky přesným úhlem 70° od základny a zároveň umístěním v teoreticky přesné vzdálenosti 20 mm od měrné roviny kužele. Měrná rovina kužele je definována na průměru 30 mm a kolmo k ose kužele. Základna je zde definována souborem situačního prvku osy kužele a situačního prvku bodu, který je dán jako průsečík měrné roviny a osy kužele. [23]



Obrázek 18 Příklad tolerančního intervalu omezeného v umístění základnou [23]

Na obrázku 19 je vylíčen postup pro získání základny jmenovitého prvku – válce. Na výkrese je stanovený jmenovitý (ideální) integrální prvek. Dále je třeba nějakým způsobem získat skutečný (neideální) integrální prvek, který odpovídá právě jmenovitému integrálnímu prvku. Na získaném skutečném integrálním prvku

se pro stanovení základny provedou operace extrakce, přiřazení a následně odvození. [23]



Obrázek 19 Ilustrace prvků použitých pro ustavení jednotlivé základny válce [23]

▪ Rozlišujeme několik typů základen:

- **Jednotlivé základny** – „Jednotlivá základna sestává z jednoho nebo více situačních prvků založených na jednotlivém prvku nebo jeho části.“ [23] Písmeno označující základnu se zapisuje do třetího pole orámované tolerance [25]

- **Společné základny** – „Společná základna sestává z jednoho nebo více situačních prvků ustavených za tímto účelem seskupením povrchu.“ [23] Písmena základen se zapisují do třetího pole orámované tolerance spojeny spojovníkem. [25]

- Soustavy základen – „Soustava základny je tvořena požadovanou sekvencí dvou nebo tří jednotlivých nebo společných základen. Soustava základny sestává ze dvou nebo tří situačních prvků vyplývajících ze seskupení uvažovaných povrchů.“ [23] Písmena základen se zapíší do třetího, čtvrtého a popřípadě pátého pole orámované tolerance dle pořadí, které určí konstruktér. Přiřazené prvky, které se použijí k sestavení soustavy základny mají přesně danou orientaci, ale odvozují se v pořadí dle geometrické specifikace, tudíž je jejich umístění závislé na pořadí této specifikace. [23]

3.4 Rozdíly ve vyhodnocování geometrických tolerancí dle norem ISO 1101 a ASME Y14.5

Nyní se zaměříme na rozdíly ve vyhodnocování geometrických tolerancí v mezinárodních normách ISO 1101, také známých jako GPS, a amerických normách ASME Y14.5, také známých jako GD&T (Geometrical dimensioning and Tolerancing).

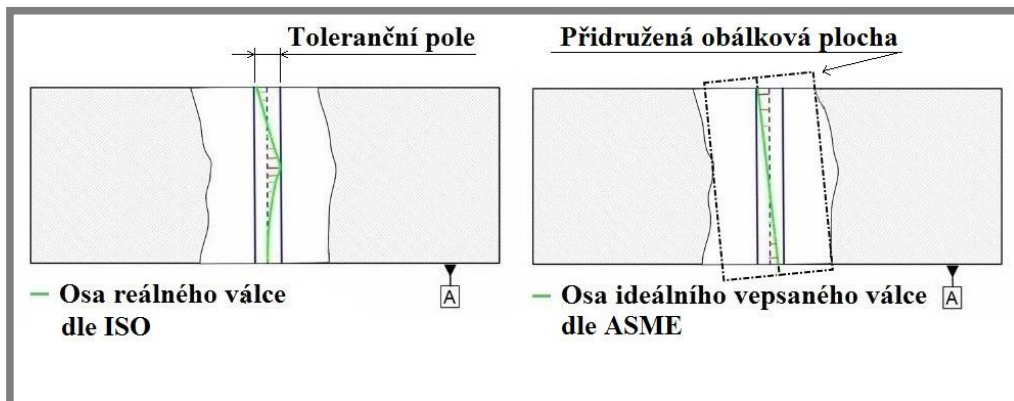
U výše uvedených norem může docházet k odlišnostem při vyhodnocování tolerancí orientace. Tolerance orientace aplikované na osy nebo střední roviny mají v normách ISO a ASME odlišný výklad. Tolerance orientace se dle ISO 1101 vyhodnocují na nedokonalých (skutečných) osách nebo středních plochách, zatímco normy ASME Y14.5 popisují vyhodnocování tolerancí orientace na dokonalých osách či středních rovinách přidružené obalové plochy (pravý geometrický protějšek). [9]

Popis získání skutečných os a středních rovin je popsán v kapitole 3.3.3 Model geometrické specifikace (podkapitola Příklady aplikací operací prvků). Popis získání dokonalých os bude znázorněn na následujícím příkladu.

3.4.1 Příklad přidružení válce (dle ASME Y14.5)

Dokonalá osa je osa dokonalého válce vepsaného (nebo opsaného) povrchu nedokonalého (reálného) válce. V tomto je vyhodnocování dle ASME poměrně jednodušší než podle ISO. [26]

Obrázek 20 znázorňuje rozdíl os (získaných jak podle ISO tak ASME)



Obrázek 20 Rozdíl os - převzato a upraveno ze zdroje [27]

Z důvodu odlišných postupů při získávání os (dle uvedených norem) se mohou výsledky při vyhodnocování tolerancí orientace lišit.

3.5 Rozdíly v aplikaci geometrických tolerancí v ISO a ASME normách [28]

3.5

V předešlé kapitole byl kladen důraz na vyhodnocování. Tato kapitola bude zaměřena na další rozdíly uvedených norem.

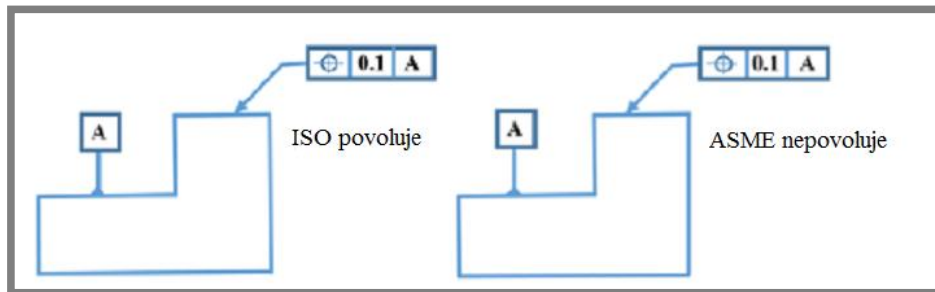
Oba standardy jsou velmi podobné a dokáží definovat geometrii a funkci výrobku dle potřeby. ISO i ASME přesně určují tolerance velikosti, tvaru, orientace, umístění, profilu a házení. Za obvyklé symboly s totožným výkladem lze mezi těmito standardy považovat například základní prvek, vztažný bod, promítaná toleranční zóna či základní rozměr. Níže budou přiblíženy některé rozdíly mezi ISO a ASME.

Rozdílů v těchto dvou normách je mnoho a všechny se dají rozčlenit do těchto kategorií: zásady, výklad, symboly a terminologie. Budeme se zabývat pouze těmi nejdůležitějšími z kategorie „výklad“ jelikož jsou spojeny s aplikacemi geometrických tolerancí.

Některé geometrické tolerance s totožným symbolem, hodnotou tolerance a materiálovými podmínkami jsou v ISO a ASME vysvětlovány odlišně. Jako příklad lze uvést toleranci rovinnosti, kterou lze v ISO použít na dva různé povrchy, kdežto v ASME ji lze aplikovat pouze na jeden povrch.

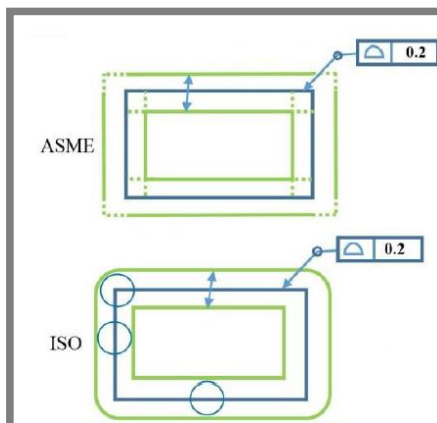
Dále ISO umožňuje přidávat na tolerance soustřednosti a symetrie modifikátory „Maximální materiálová podmínka“ a „Nejmenší materiálová podmínka“, ale ASME tuto možnost nenabízí.

ISO dovoluje aplikovat toleranci polohy na plochu, kdežto podmínkou ASME je, aby byla pozice uplatněna jen pro prvek velikosti. Obrázek 21 znázorňuje použití tolerance polohy k povrchu.



Obrázek 21 Aplikace tolerance polohy na povrch [28]

V rámci tolerování profilů vymezují standardy rozdílnou toleranční zónu v ostrých rozích. Toleranční zóna je dle ISO definována dvěma rovnoměrně nebo nerovnoměrně rozmístěnými plochami nebo liniemi vytvořenými posouváním koule nebo kruhu kolem jmenovitého profilu. ASME vymezuje dvě rovnoměrně nebo nerovnoměrně rozmístěné plochy nebo linie kolem skutečného profilu, které se táhnou k průsečíku bodů. Obrázek 22 porovnává způsob tolerování profilů mezi oběma standardy).



Obrázek 22 Srovnání tolerování profilů pro ASME a ISO [28]

Dle ISO může být vzhledem ke jmenovitému povrchu součástí tolerance házení normální (považováno za výchozí směr) nebo nenormální. V ASME je zóna tolerance vždy normální.

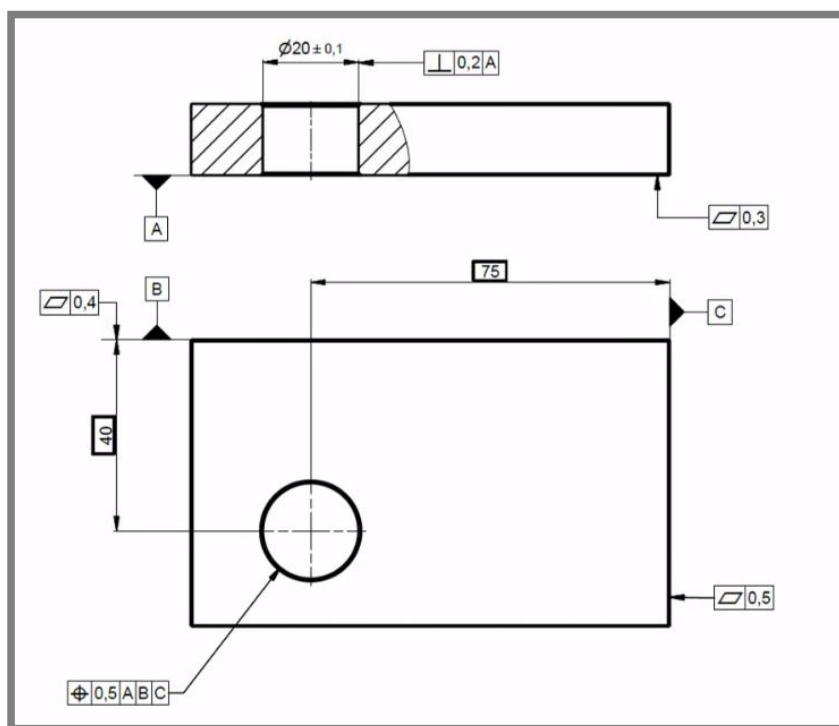
3.6

3.6 Postup vyhodnocování v softwaru GOM Inspect

Po seznámení s principy získání přidružených geometrických prvků (pomocí kterých je vyhodnocena tolerance) a základů, a s rozdíly ve vyhodnocování dle ISO i ASME, zbývá už jen vyhodnocení tolerance. Vhodným softwarem pro toto vyhodnocení může být právě GOM Inspect.

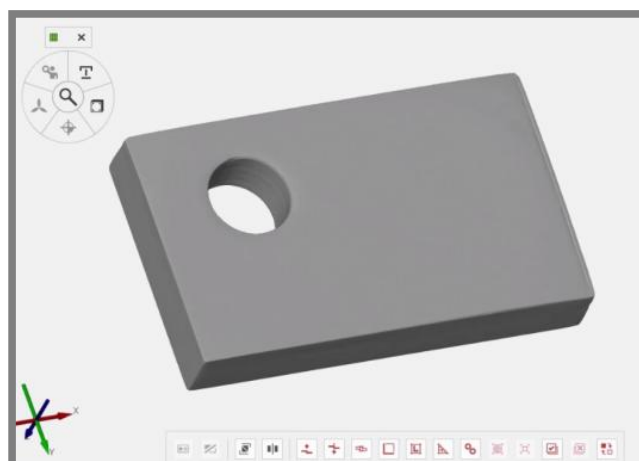
GOM Inspect je program určený zejména pro vyhodnocování geometrických tolerancí. Kromě toho umožňuje i porovnání modelu výrobku s ideálním modelem. Společnost GOM tento software poskytuje zdarma.

Pro snadné pochopení práce s programem je nevhodnější demonstrovat postup vyhodnocení úchytky na nějakém příkladu, konkrétně se bude jednat o zjištění tolerance kolmosti osy díry k základně A. Na obrázku 23 je část výkresu součásti, kde je definována kolmost díry s tolerancí 0,2.



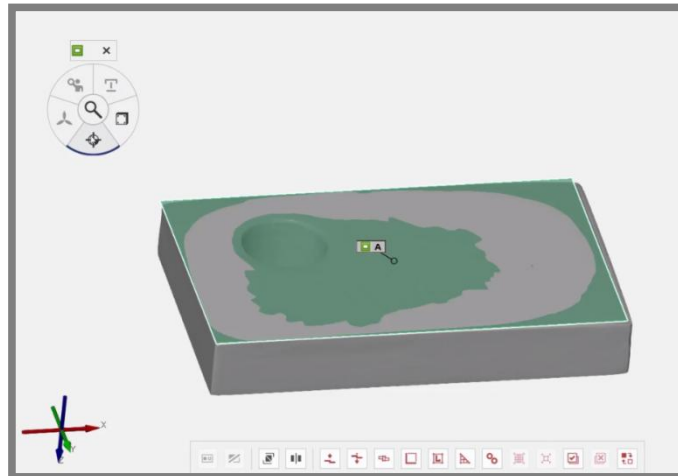
Obrázek 23 Výkres součásti [27]

Na obrázku 24 je model povrchu obrobku na kterém bude zkoumána geometrie.



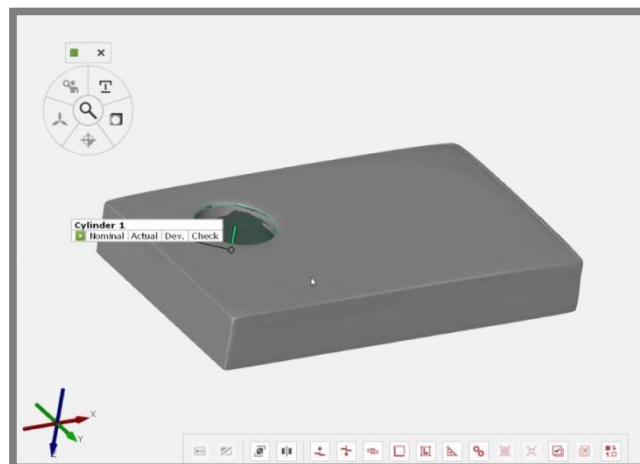
Obrázek 24 Neideální model [27]

Prvním krokem bude získání základny, to se provede přiřazením ideálního prvku typu rovina k neideálnímu prvku neideálního modelu. Následně se z této roviny vytvoří základna (viz. Obrázek 25).



Obrázek 25 Základna A [27]

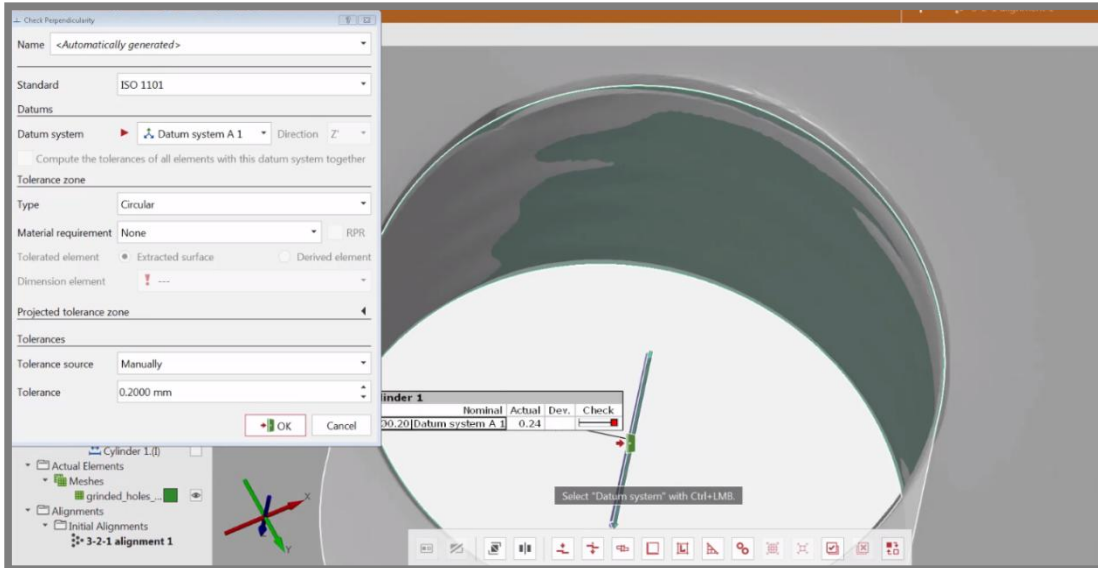
Dále se provede přidružení ideálního válce k neideální díře neideálního modelu viz. Obrázek 26).



Obrázek 26 Přidruženého válce [27]

Nakonec se vybere válec a na něm se zhodnotí úchylka kolmosti vůči základně A.

Tento obrázek dokazuje že díra nespĺňuje specifikaci, maximální odchylka je 0,24, přičemž na výkrese byla dána tolerance 0,2 (viz obrázek 27)



Obrázek 27 Vyhodnocení odchylky [27]

4 DISKUZE

Bakalářská práce se zabývá vyhodnocováním geometrických tolerancí na modelech získaných za pomoci 3D optické digitalizace. V první části je zpracována problematika optické digitalizace v oblasti standardizace optických systémů (norma ISO a ASME). Dané normy jsou v mnoha ohledech stejné, a proto je třeba hledat rozdíly v poněkud detailnějším úhlu pohledu. Po nastudování různých materiálů bylo zjištěno, že rozdíl nastává při měření tolerancí orientace, a je skryt ve způsobu získání geometrického prvku reprezentujícího reálný tvar součásti. Tento prvek je následně porovnáván s ideální geometrií stanovené konstruktérem. Z důvodu odlišných postupů a definic vyhodnocování měřených prvků je jasné, proč se výsledky vyhodnocování těchto tolerancí liší.

Další část bakalářské práce popisuje postup vyhodnocování geometrických specifikací (viz Praktická část). Zde bude znázorněn postup zjišťování úchytky v praxi.

4.1

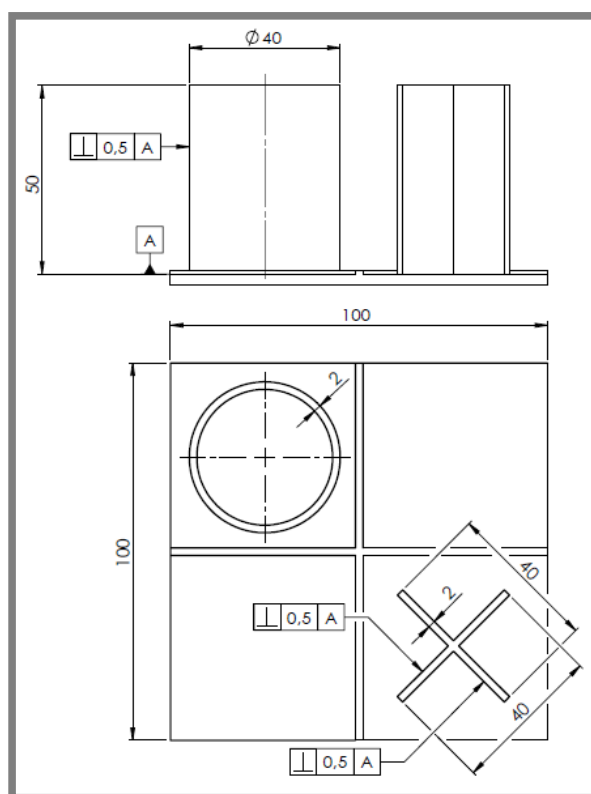
4.1 Praktická část

Jedním z hlavních cílů této práce bylo zjistit důvod rozdílných výsledků při vyhodnocování některých geometrických tolerancí v závislosti na aplikovaných normách a to konkrétně ISO 1101 a ASME 14.5. Tento cíl se dále člení do úkolů:

- Zjistit, u jakých konkrétních tolerancí dochází ke zmiňovaným rozdílům.
- Zjistit důvod rozdílných výsledků vyhodnocování.
- Zpracovat problematiku těchto rozdílů a následně demonstrovat na zvoleném typu geometrické tolerance.

U jakých konkrétních tolerancí, a z jakého důvodu k rozdílu dochází bylo zpracováno v kapitole 3.4.

Pro lepší představu a znázornění rozdílů byl demonstrován postup vyhodnocení tolerancí orientace na jednoduchém dílu. Jako příklad tolerance orientace byla zvolena kolmost, která zřetelně znázorňuje již zmiňovaný rozdíl ve vyhodnocování. Tolerance kolmosti bude vyhodnocena jak na válci, tak na rovině vzhledem k základně. Na obrázku 28 je zjednodušený výkres součásti s geometrickými specifikacemi. Velikost tolerančního pole byla zvolena 0,5 mm pro oba případy. Ve vyhodnocování šlo pouze o znázornění rozdílů mezi normami a specifikace byly zadány pouze pro úplnost.



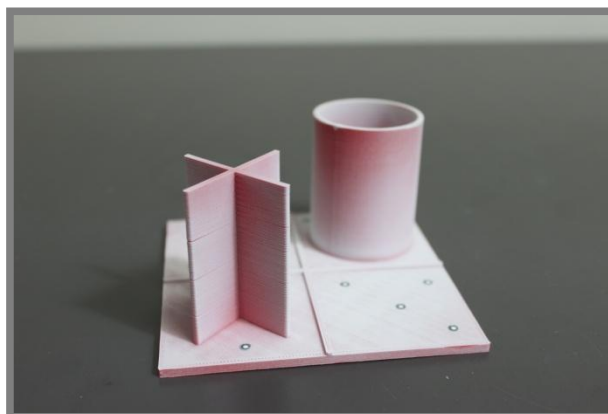
Obrázek 28 Výkres součásti

Nejprve byl zhotoven 3D model součásti. Model byl vymodelován s pomocí softwaru SolidWorks. Dalším krokem bylo vytištění tohoto dílu na 3D tiskárně Prusa i3 MK1. Jako materiál byl použit plast ABS. Celková doba tisku byla 4 hodiny a 37 minut. Z důvodu rozdílných rychlostí chladnutí materiálu po krajích a uprostřed prvku „X“ došlo k odloupení některých vrstev materiálu. Nicméně pro vyhodnocení geometrické tolerance, která pouze znázorňuje princip vyhodnocování, nemá smysl takovéto poškození řešit, právě naopak, deformace prvku ve výsledku způsobí zřetelnější odchylky. Na obrázku 29 je tištěný díl v prostředí tiskárny.



Obrázek 29 Díl v prostředí tiskárny

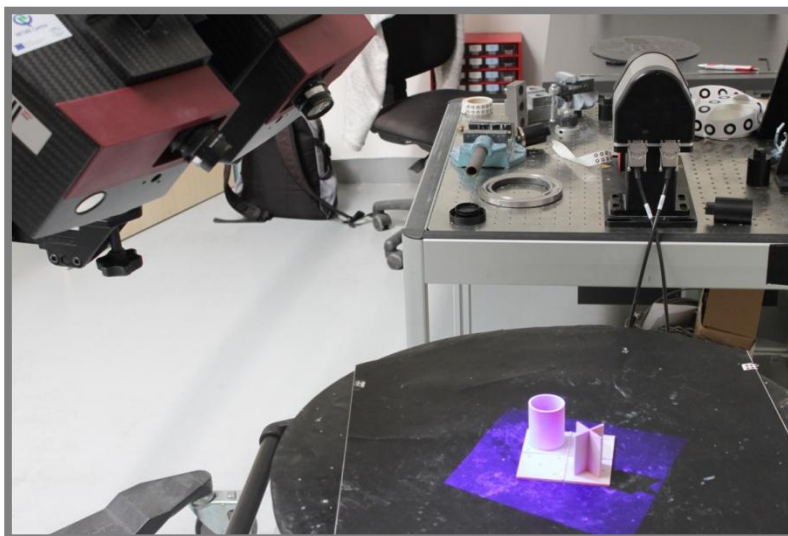
Po vytištění je povrch dílu při použití materiálu ABS příliš lesklý pro skenování a skener tak není schopen zachytit celý povrch dílu. Proto bylo třeba povrch opatřit matující vrstvou. K tomu byl použit křídový sprej MR 2000 anti-reflex L. Pro lepší orientaci skeneru při pořizování snímků z různých úhlů pohledu bylo třeba na součást přilepit referenční značky. Na obrázku 30 je vytištěná součást připravená pro skenování.



Obrázek 30 Vytištěná součást

Následně se provedlo skenování dílu za pomoci 3D optického skeneru ATOS Triple Scan od firmy GOM. Výstupem tohoto skenování byl 3D model vytištěného dílu ve formátu STL. GOM Acceptance test (Přijímací test přesnosti skeneru), který byl proveden pověřenou osobou firmy GOM, uvádí přesnost tohoto skeneru za ideálních podmínek 0,005 mm, což je pro náš případ měření postačující, jelikož vyhodnocování tolerancí bude provedeno s přesností na 2 desetinná místa. Zmiňovaný test byl proveden na základě směrnice VDI/VDE 2634 Část 3, při měření průměrů a roztečí

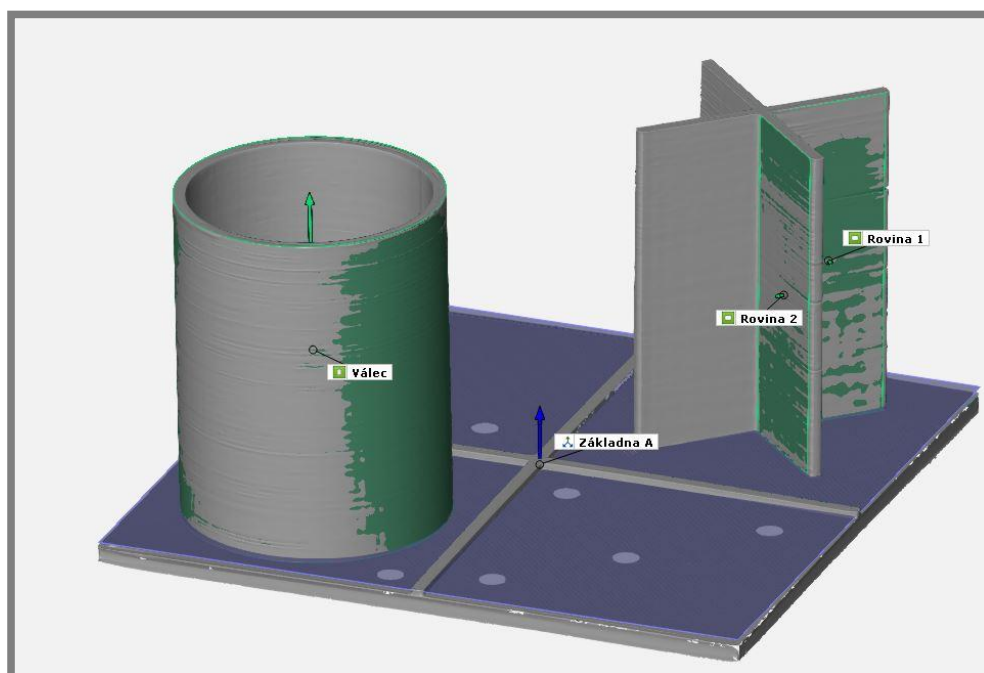
koulí. Pro měření byla využita optika MV 170. Na obrázku 31 je skener snímající povrch vytištěného modelu.



Obrázek 31 Skenování vytištěného dílu skeneru ATOS Triple Scan

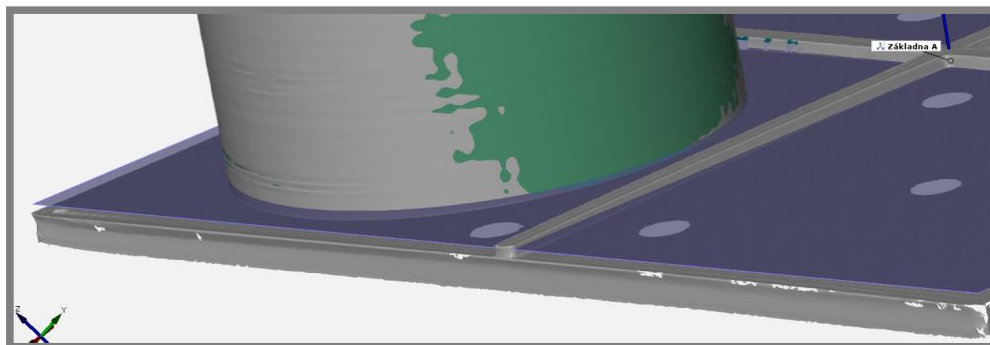
Poslední součástí zjišťování geometrické specifikace bylo samotné vyhodnocení odchylek kolmosti. K tomuto účelu posloužil software GOM Inspect. Na dílu byla vyhodnocena odchylka kolmosti válcovitého prvku vzhledem k základně A, a odchylka kolmosti rovinného prvku vzhledem k základně A, jak podle norem ISO 1101, tak podle norem ASME Y14.5.

Na Obrázku 32 je díl v prostředí GOM Inspect s přiřazenými prvky - válec, rovina 1, rovina 2 a základna A.



Obrázek 32 Díl s přiřazenými prvky

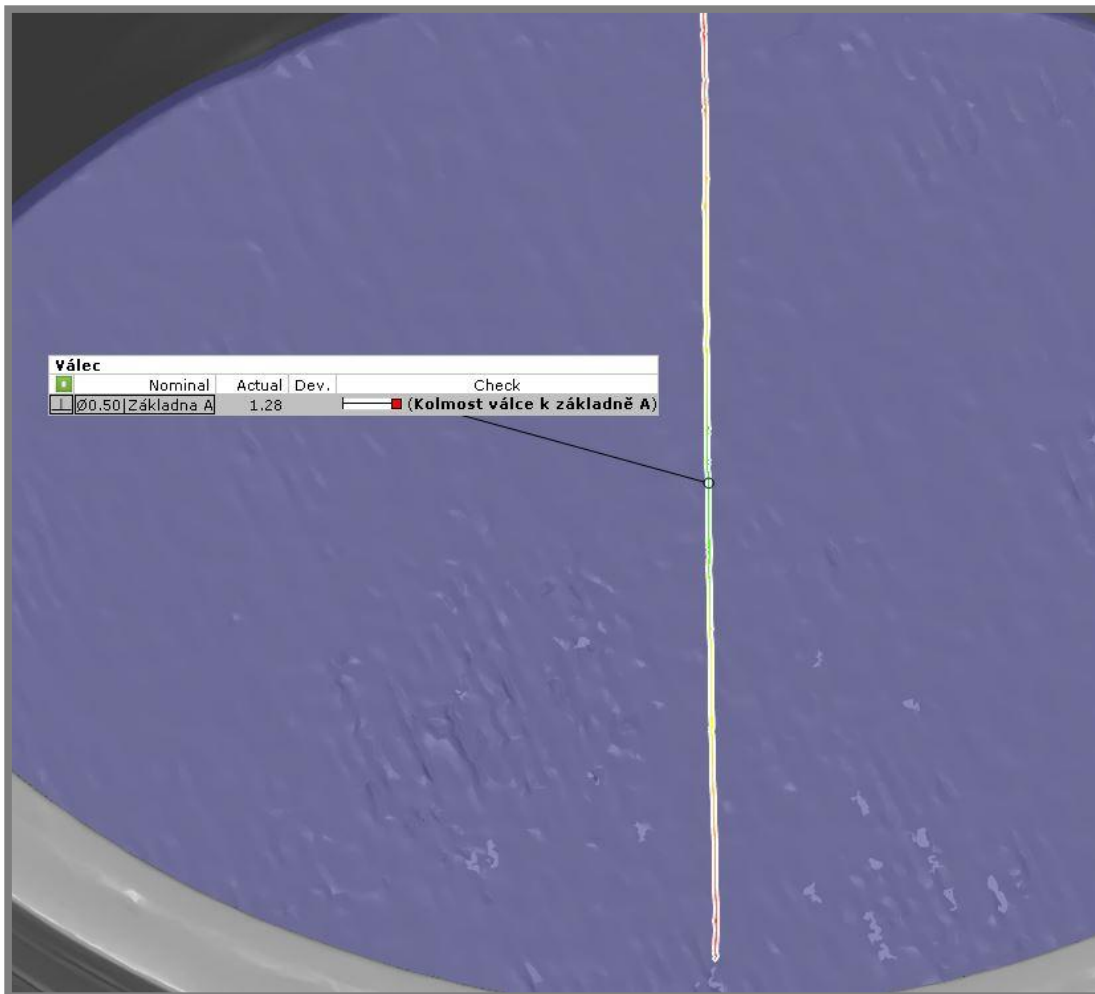
Z obrázku 33 je patrné, že plocha základny A je vypouklá. Což zároveň dobře znázorňuje přidružení prvku základny k této ploše, které se provádí „dotykem třech bodů“. Všechny tyto body jsou zhruba uprostřed plochy a tím pádem je u krajů základna vzdálena od povrchu. Toto má na inspekci geometrických tolerancí velký vliv a proto se doporučuje pro základny specifikovat geometrickou toleranci rovinnosti. Pokud plocha základny nesplňuje požadavek rovinnosti, nemá smysl zjišťovat odchylky spojené s touto plochou respektive základnou. [19] Pro znázornění rozdílů mezi vyhodnocováním dle norem ISO a ASME to ovšem nevádí.



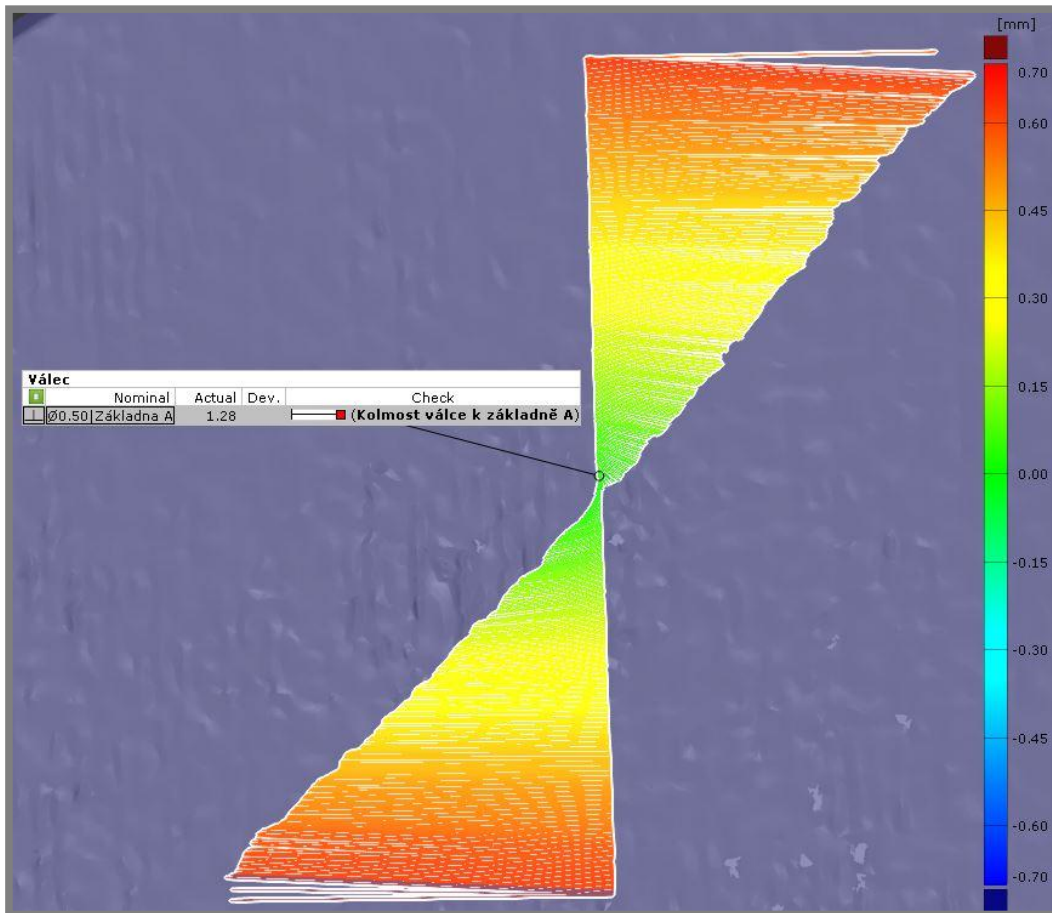
Obrázek 33 Díl s přiřazenými prvky

Při vyhodnocování byly nebo nebyly splněny požadované specifikace dané na výkresu. Což však není velice podstatné, z důvodů které byly zmíněny již dříve.

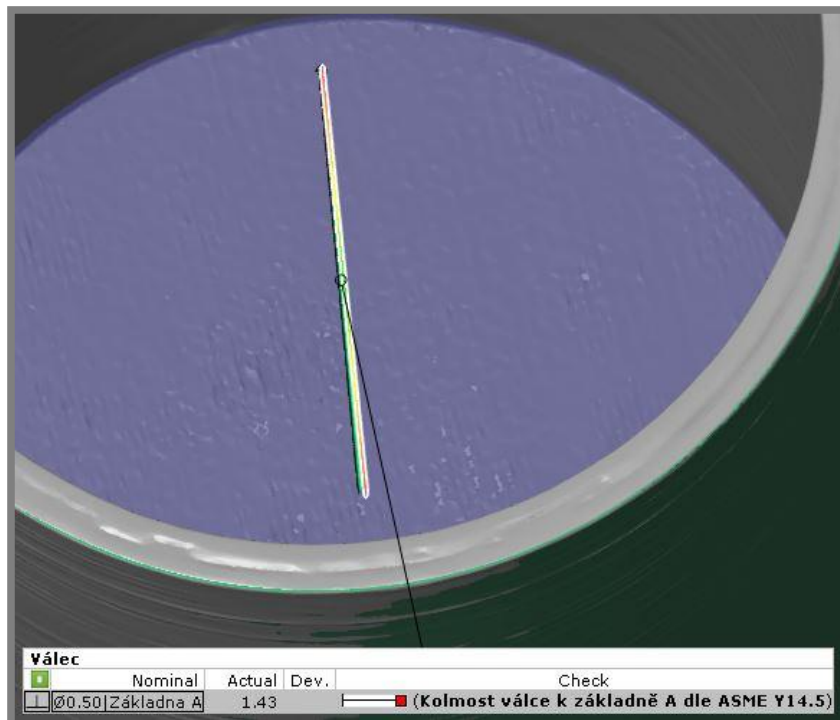
Následující 4 obrázky zobrazují výsledky vyhodnocení odchylky kolmosti válce vzhledem k základně A v softwaru GOM Inspect. Konkrétně na obrázku 34 skutečná osa válce při vyhodnocování dle ISO, na obrázku 35 vektorové znázornění odchylek při vyhodnocování dle ISO (při desetinásobném zvětšení odchylek), na obrázku 36 osa ideálního opsaného váce při vyhodnocování dle ASME, na obrázku 37 vektorové znázornění odchylek při vyhodnocování dle ASME (při desetinásobném zvětšení odchylek).



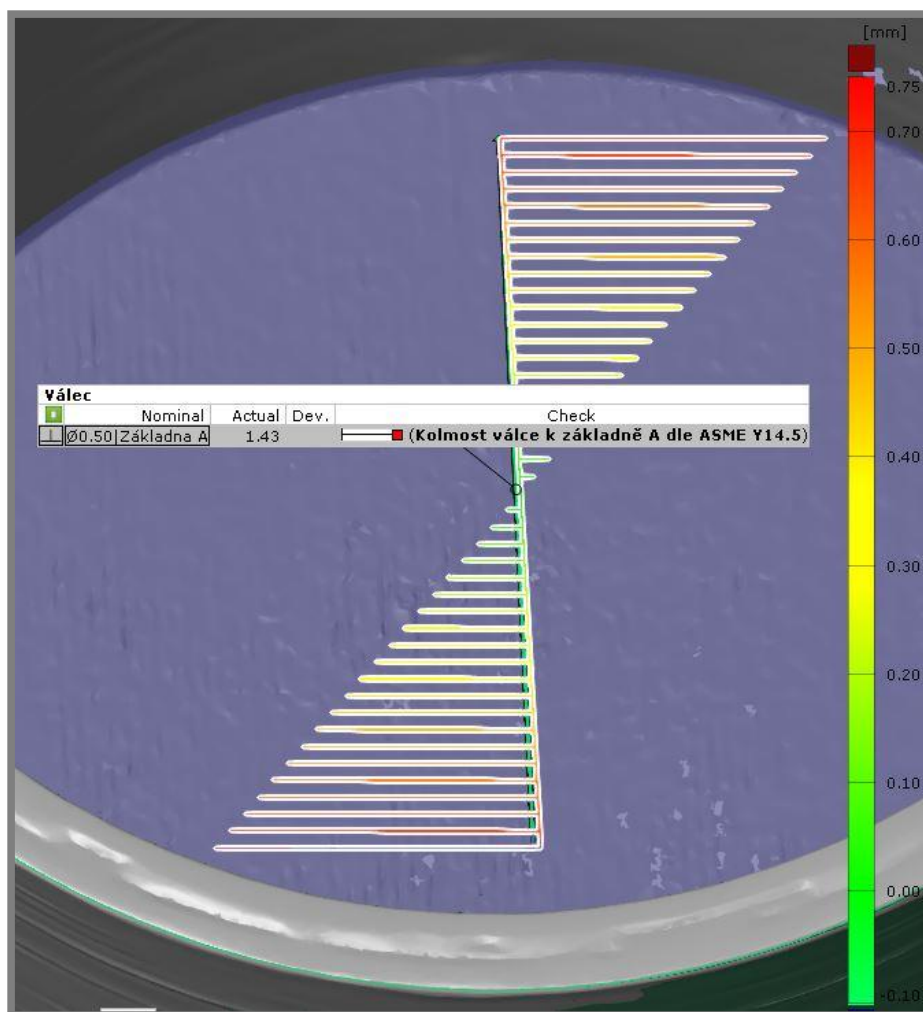
Obrázek 34 Skutečná osa válce při vyhodnocování dle ISO



Obrázek 35 Vektorové znázornění odchylek při vyhodnocování dle ISO



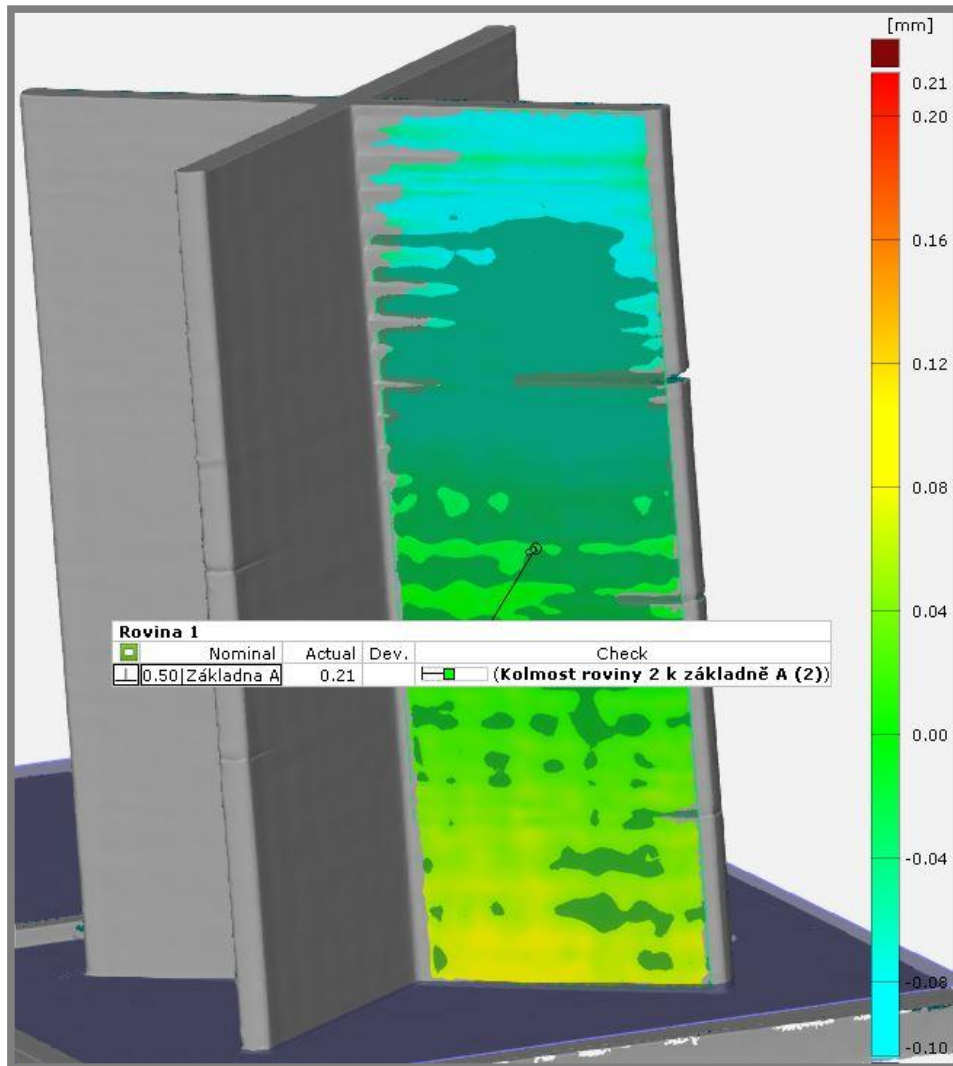
Obrázek 36 Osa ideálního opsaného válce při vyhodnocování dle ASME



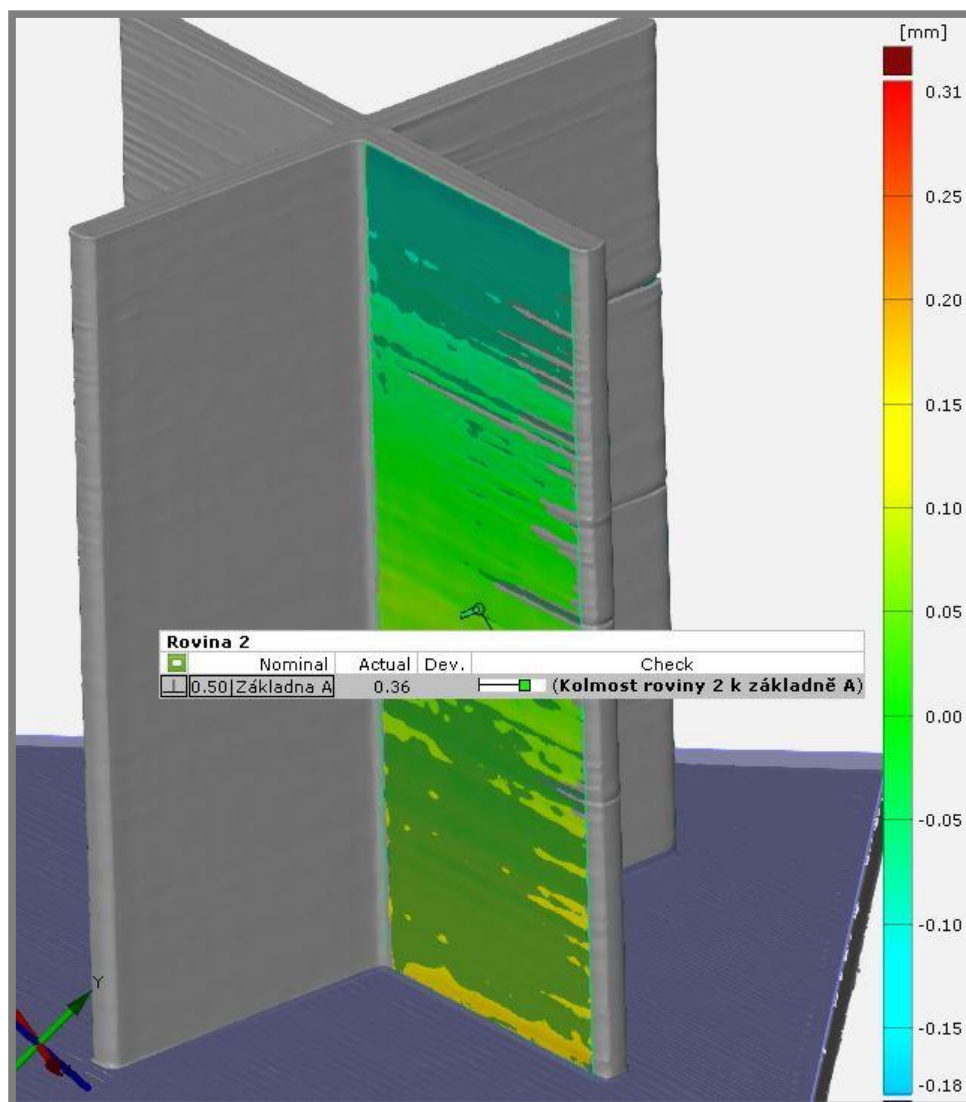
Obrázek 37 Vektorové znázornění odchylek při vyhodnocování dle ASME

Výsledek inspekce jednoznačně poukazuje na rozdíl v maximálních hodnotách odchylek při vyhodnocování kolmosti válcovitého prvku. Dle normy ISO je maximální výchylka osy válce 1,28 mm a dle ASME je 1,43.

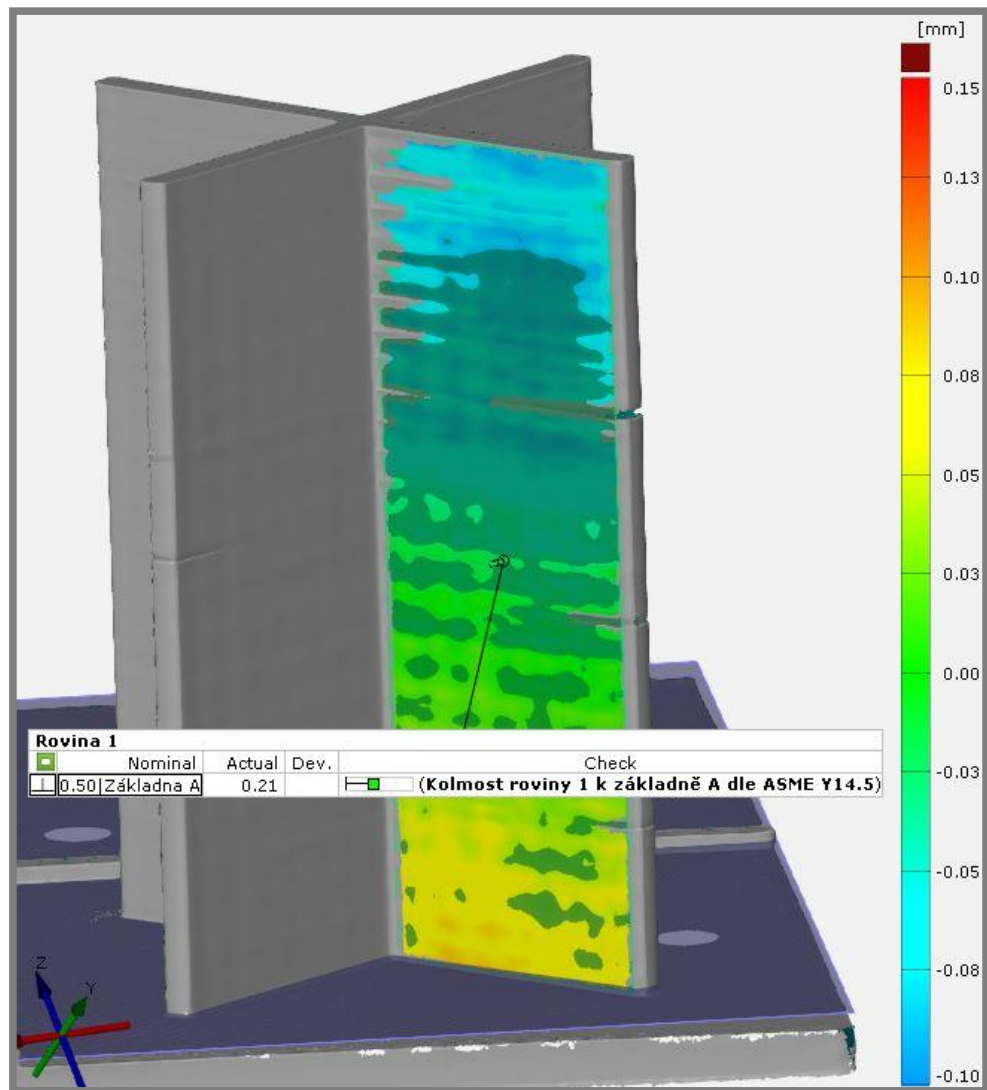
Následující 4 obrázky zobrazují výsledky vyhodnocení odchylky kolmosti rovin 1 a 2 vzhledem k základně A v softwaru GOM Inspect. Konkrétně na obrázku 38 Rovina 1 při vyhodnocování dle ISO, na obrázku 39 Rovina 2 při vyhodnocování dle ISO, na obrázku 40 Rovina 1 při vyhodnocování dle ASME, na obrázku 41 Rovina 2 při vyhodnocování dle ASME.



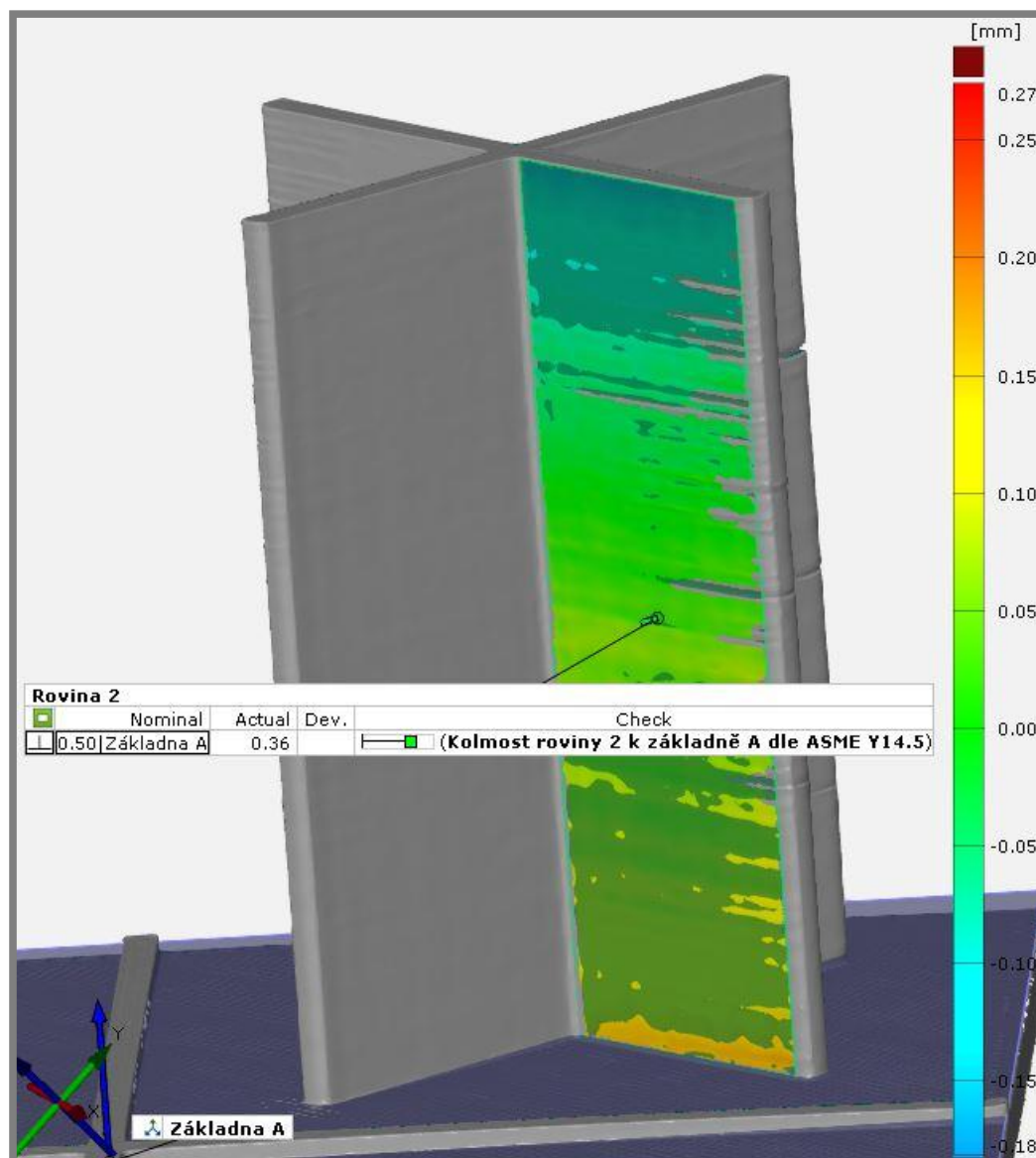
Obrázek 38 Rovina 1 při vyhodnocování dle ISO



Obrázek 39 Rovina 2 při vyhodnocování dle ISO



Obrázek 40 Rovina 1 při vyhodnocování dle ASME



Obrázek 41 Rovina 2 při vyhodnocování dle ASME

Při vyhodnocování kolmosti roviny prvku „X“ k základně A byly naměřeny stejné hodnoty odchylek při použití norem ISO i ASME. Z měření je tedy patrné, že při vyhodnocování tolerance kolmosti roviny vůči základně nedochází k rozdílům při použití norem ISO nebo ASME. Je to dáno tím, že pro získání přidružené roviny (k neideální) zkoumané rovině se v obou případech používá výpočetní metoda Gauss best-fit.

5 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala vyhodnocením geometrických tolerancí za pomoci 3D skenovaných dat součástí. K vyjádření tolerancí slouží mezinárodní jazyk GPS (Geometrical Product Specifications), který pro interpretaci využívá různých symbolů. Tolerance by měly kvantifikovat odchylky takovým způsobem, aby výrobek splňoval svou funkci, ke které byl navržen. Komise ISO TC 213 se zabývá vývojem řady ISO-GPS norem. Těchto norem je velká řada a proto se dle normy ISO 14638 každá norma ISO GPS řadí do maticového modelu, který popisuje důležitost, rozsah a provázanost jednotlivých norem. Účelem zmiňovaných norem je stejný výklad výkresové dokumentace ve všech zemích. Důležitou částí v oblasti vyhodnocování geometrických specifikací představují základny, které umožňují umístění tolerančního intervalu tam, kde je potřeba prvek (či více prvků) vztáhnout k jiným.

Vyhodnocení geometrických specifikací bylo provedeno v softwaru GOM Inspect včetně komparace výsledků dle norem ISO a ASME Y14.5.

Na praktickém příkladu byly dokázány rozdíly mezi těmito normami. Výsledky měření ukázaly, že v některých případech vyhodnocení geometrických tolerancí je skutečně možné získat různé výsledky pro stejný typ geometrické tolerance. Jedná se o geometrické tolerance orientace a důvodem je to, že orientace aplikované na osy nebo střední roviny mají v normách ISO a ASME odlišný výklad.

Ačkoliv jsou tyto normy z větší části stejné, bylo zjištěno, že existují rozdíly při měření tolerance orientace, díky čemuž se výrazně liší výsledky vyhodnocování. Dále se normy neshodují v některých aplikacích, zásadách, symbolech a terminologii geometrických tolerancí.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Spisk.cz, *Technologieskenováníve 3D*. [online]. [cit. 13.4.2017]. Dostupné z: <http://www.spsks.cz/wp-content/uploads/2016/03/Technologieskenov%C3%A1n%C3%AD-ve-3D-0.pdf>
- [2] VÍTOVEC, T. *Užití geometrických tolerancí na výkresech a jejich měření*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2014. 70 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Bartoň, Ph.D. [cit. 18.5.2017]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/12510/1/final.pdf>
- [3] ŠNAJDÁREK, L. *Metody 3D laserového skenování obrobků ve výrobním procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Opl. [cit. 11.4.2017]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30290599.pdf>
- [4] ČERMÁK, J. *Metody 3D skenování objektů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D. [cit. 11.4.2017]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103850
- [5] BERARDIN, J.-Angelo, David MACKINNON, Luc COURNOYER a Bernard LARQUIER. Metrological characterization of 3D imaging systems: progress report on standards developments. In: 17th International Congress of Metrology [online]. Les Ulis, France: EDP Sciences, 2015, 2015-09-21, s. 13003- [cit. 7.4.2017]. DOI: 10.1051/metrology/201513003. ISBN 978-2-7598-1866-2. Dostupné z: <http://cfmetrologie.edpsciences.org/10.1051/metrology/20150013003>
- [6] GUIDI, G. Metrological characterization of 3D imaging devices. Politecnico di Milano. [online]. [cit. 27.4.2017].
- [7] ISO 10360-8:2013. *Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) -- Part 8: CMMs with optical distance sensors*. [online]. Geneva: ISO, 2013. [cit. 11.5.2017]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/54522.html>
- [8] ASTM International. *Committee E57 on 3D Imaging Systems*. [online]. © 1996-2017 [cit. 9.4.2017]. Dostupné z: <https://www.astm.org/COMMITTEE/E57.htm>
- [9] HENZOLD, G. *Geometrical dimensioning and tolerancing for design, manufacturing and inspection: a handbook for geometrical product specifications using ISO and ASME standards*. 2nd ed. London: Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 978-0-7506-6738-8.

- [10] HN Metrology Consulting. *What is Geometrical Product Specifications (GPS)?* [online]. © 2018, last modified on 11 May 2015 [cit. 2.5.2017]. Dostupné z: <https://www.hn-metrology.com/gps.htm>
- [11] SRINIVASAN, V. (2015) *Geometrical Product Specification*. In: The International Academy for Production Engineering, Laperrière L., Reinhart G. (eds) CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg. Online ISBN: 978-3-642-35950-7. [online]. 29 April 2015 [cit. 8.5.2017]. Dostupné z: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-35950-7_16757-1
- [12] *GPS v teorii a praxi. Rozměrové a geometrické specifikace produktu a jejich ověřování*. [online]. [cit. 3.5.2017]. Dostupné z: http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/PMTR/05_GPS_v_teorii_a_praxi.pdf
- [13] ČSN EN ISO 14638 (014104). *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Maticový model*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Třídící znak 01 4104.
- [14] PEJŠA, Jan. *Návrh a rozbor možností tolerování převodovky*. Praha: Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta strojní ČVUT v Praze, Ústav konstruování a částí strojů, 2017. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Petr, PhD. [cit. 20.4.2018]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73445/F2-BP-2017-Pejša-Jan-BP%20Jan%20Pejša.pdf?sequence=-1>
- [15] Seznam technických norem (ČSN). Třída 0144 - Tolerance tvaru a polohy, geometrie povrchu. *Normy.biz* [online]. ©2003-2017 [cit. 6.4.2017]. Dostupné z: <https://seznam.normy.biz/trida/list/0144>
- [16] *Online Browsing Platform (OBP)*. [online]. [cit. 20.4.2018]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/>
- [17] MORSE, Edward. Tolerancing Standards: A Comparison. *Quality magazine*. [online]. © 2018 [cit. 25.4.2018]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/93437-tolerancing-standards-a-comparison>
- [18] ČSN EN ISO 17450-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Obecné pojmy - Část 1: Model geometrické specifikace a jeho ověřování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Třídící znak 01 4103.
- [19] ANWER, Nabil & SCHLEICH, Benjamin & MATHIEU, Luc & WARTZACK, Sandro. (2014). *From Solid Modelling to Skin Model Shapes: Shifting paradigms in Computer-Aided Tolerancing*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 1. 10.1016/j.cirp.2014.03.103. [online]. © 2018 [cit. 9.5.2018]. Dostupné z:

- https://www.researchgate.net/publication/260133626_From_Solid_Modelling_to_Skin_Model_Shapes_Shifting_paradigms_in_Computer-Aided_Tolerancing
- [20] ANWER, Nabil & BALLU, Alex & MATHIEU, Luc. (2013). *The skin model, a comprehensive geometric model for engineering design*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 62. 143–146. 10.1016/j.cirp.2013.03.078. [online]. © 2018 [cit. 2.5.2018]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/256673867_The_skin_model_a_comprehensive_geometric_model_for_engineering_design
- [21] SCHLEICH, Benjamin & ANWER, Nabil & MATHIEU, Luc & WARTZACK, Sandro. (2014). *Skin Model Shapes: A new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering*. Computer-Aided Design. 10.1016/J.CAD.2014.01.001. [online]. © 2014 [cit. 24.4.2018]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448514000025>
- [22] NOVÁK, Jiří. *Funkční plochy a struktura povrchu*. Brno: Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, 2008. 84 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Svoboda, CSc. [cit. 13.2.2018]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5120
- [23] ČSN EN ISO 5459. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Základny a soustavy základen*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Třídící znak 01 4402.
- [24] ČSN EN ISO 14660-1. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Geometrické prvky - Část 1: Všeobecné termíny a definice*. Praha: Český normalizační institut, 2000. Třídící znak 014121.
- [25] Internetový portál Elektrotechnika. *Předepisování přesnosti rozměrů, tvaru a polohy*. [online]. [cit. 28.4.2017]. Dostupné z: https://coptkm.cz/portal/temporary/1_10931_1567705774094058.pdf
- [26] *GOM Inspect 2016 v2.0.1*. [software]. [přístup 13. května 2017]. Dostupné z: <http://support.gom.com>
- [27] GOM Training Webinar - A Beginner's Guide to GD&T. In: *Youtube* [online]. 16.12.2016 [cit. 28.4.2017]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Y1ZKY1K7NMQ&list=PLjtopiq1pkRIB1blOMnkaOMtSKa4XJGpD>. Kanál uživatele GOMMetrology.
- [28] HEYSIATTALAB, S. & MORSE, E. P. *From STEP to QIF: Product and Manufacturing Information*. ASPE 2016 Annual Meeting Volume 65.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

ASME	American Society of Mechanical Engineers (Americké sdružení strojních inženýrů)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Americké sdružení pro testování a materiály)
CAD	Computer Aided Design (Počítačová podpora konstruování)
CMM	Coordinate measuring machine (Souřadnicový měřicí přístroj)
ČSN	Česká technická norma (původně Československá státní norma)
EN	Evropské normy
GD&T	Geometrical dimensioning and Tolerancing (Geometrické kótování a tolerování)
GMA	Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Společnost měřicí a automatizační techniky)
GPS	Geometrical Product Specifications (Geometrické specifikace produktu)
ICP	Iterative Closest Point (Iterativní nejbližší bod)
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
OSIS	Optical Sensor Interface Standard (Optický standard společného rozhraní)
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (Asociace pro elektrické, elektronické a informační technologie)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (Svaz německých inženýrů)
WG	Working Group (Pracovní skupina)

8 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Tabulka 1 ISO GPS Maticový model

Obrázek 1 Jmenovitý model

Obrázek 2 Neideální model povrchu

Obrázek 3 Sestavení jmenovitého modelu

Obrázek 4 Odvozená část prvku

Obrázek 5 Situační přímka pro válec

Obrázek 6 Situační rovina pro pár rovin

Obrázek 7 Rozdělení neideálního modelu povrchu

Obrázek 8 Extrahované body z neideálního prvku neideálního modelu povrchu

Obrázek 9 Příklad oddělení profilu

Obrázek 10 Příklad přidružení

Obrázek 11 Příklad konstrukce přímky pomocí průsečíku dvou rovin

Obrázek 12 Specifikace rovinnosti

Obrázek 13 Operace prvků - tolerance rovinnosti

Obrázek 14 Specifikace kolmosti

Obrázek 15 Operace prvků - tolerance kolmosti - získání reálné osy

Obrázek 16 Operace prvků - tolerance kolmosti - získání základny

Obrázek 17 Operace prvků - tolerance kolmosti – Přidružení

Obrázek 18 Příklad tolerančního intervalu omezeného v umístění základnou

Obrázek 19 Ilustrace prvků použitých pro ustavení jednotlivé základny válce

Obrázek 20 Rozdíl os - převzato a upraveno ze zdroje

Obrázek 21 Aplikace tolerance polohy na povrch

Obrázek 22 Srovnání tolerování profilů pro ASME a ISO

Obrázek 23 Výkres součásti

Obrázek 24 Neideální model

Obrázek 25 Základna A

Obrázek 26 Přidruženého válce

Obrázek 27 Vyhodnocení odchylky

Obrázek 28 Výkres součásti

Obrázek 29 Díl v prostředí tiskárny

Obrázek 30 Vytištěná součást

Obrázek 31 Skenování vytištěného dílu skeneru ATOS Triple Scan

Obrázek 32 Díl s přiřazenými prvky

Obrázek 33 Díl s přiřazenými prvky

Obrázek 34 Skutečná osa válce při vyhodnocování dle ISO

Obrázek 35 Vektorové znázornění odchylek při vyhodnocování dle ISO

Obrázek 36 Osa ideálního opsaného válce při vyhodnocování dle ASME

Obrázek 37 Vektorové znázornění odchylek při vyhodnocování dle ASME

Obrázek 38 Rovina 1 při vyhodnocování dle ISO

Obrázek 39 Rovina 2 při vyhodnocování dle ISO

Obrázek 40 Rovina 1 při vyhodnocování dle ASME

Obrázek 41 Rovina 2 při vyhodnocování dle ASME