



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

**Ústav technologie obrábění,
projektování a metrologie**

**Realizace měřicího přípravku pro
kontrolu smontovatelnosti
a rozměrové kvality vnějších krytů
rypadla**

**Implementation of measuring fixture
for checking assembly and
dimensional quality of excavator
outer covers**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2021

Bc. Tomáš OPIČKA

Studijní program: Výrobní inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Michal Koptiš

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Opička** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **457549**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Realizace měřicího přípravku pro kontrolu smontovatelnosti a rozměrové kvality vnějších krytů rypadla

Název diplomové práce anglicky:

Implementation of measuring fixture for checking assembly and dimensional quality of excavator outer covers

Pokyny pro vypracování:

- definice požadavků na měřicí přípravky
- přehled měřicích systémů
- návrh měřicího přípravku
- sestavení a rozměrová kontrola navrženého přípravku
- rozměrová kontrola vnějších krytů rypadla s využitím přípravku

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Michal Koptiš, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Michal Koptiš
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím pouze odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Tomáš Opička

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Michalovi Koptišovi za vedení mé diplomové práce, cenné rady, odborný dohled při vypracování a za čas, který mi byl ochoten věnovat při konzultacích. Poděkování patří také společnosti Doosan Bobcat s.r.o., především celému týmu z oddělení kvality a všem kolegům, kteří mi vždy ochotně poskytli pomoc, užitečné rady a pomohli realizovat praktickou část této práce.

Dále bych chtěl poděkovat blízkým přátelům za podporu a především mé milované rodině, která za mnou vždy stála a za každých okolností mě podporovala během studia i při psaní této diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou kontrolních přípravků a realizací měřicího přípravku určeného pro kontrolu smontovatelnosti a rozměrové kvality vnějších krytů rypadla na souřadnicovém měřicím stroji. Teoretická část se zaměřuje na popis částí, které se využívají při konstruování přípravků, a rozbořem jednotlivých typů měřicích přípravků aplikovaných v průmyslu. Praktická část popisuje požadavky a předpoklady pro výrobu daného typu přípravku a postupné kroky při jeho návrhu až do fáze montáže a seřízení. V závěrečné části diplomové práce se vyhodnocuje přesnost přípravku a jeho způsobilost pro proces rozměrové kontroly jednotlivých krytů na základě naměřených dat získaných metodou bezkontaktního měření.

Tato diplomová práce byla vypracována pod záštitou firmy Doosan Bobcat EMEA s.r.o.

Klíčová slova

Přípravek, měřicí přípravek, CMM, vnější kryty, rypadlo

Abstract

This diploma thesis deals with the topic of inspection fixtures and the implementation of a measurement fixture designed to check the assembly process and dimensional quality of the outer covers of the excavator using a coordinate measuring machine. The theoretical part of the thesis focuses on the description of parts that are used in the design of fixtures, and the analysis of various types of measuring fixtures applied in industry. The practical part describes the requirements and assumptions for the production of a given type of a fixture and the gradual steps in its design up to the stage of its assembly and adjustment. The final part of the diploma thesis evaluates the accuracy of the designed fixture and its suitability for the process of a dimensional inspection of individual covers on the basis of measured data obtained by the method of non-contact measurement.

This Thesis was prepared under the patronage of Doosan Bobcat EMEA s.r.o.

Key words

Fixture, checking fixture, CMM, outer covers, excavator

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
1 ÚVOD.....	9
2 SPOLEČNOST DOOSAN BOBCAT EMEA S.R.O.	10
2.1 Kompaktní rypadlo E50z	10
3 PŘÍPRAVKY.....	11
3.1 Význam přípravků v technické praxi	11
3.2 Ustavení těles v prostoru.....	12
3.2.1 Princip jednoznačného ustavení	12
3.2.2 Druhy ustavení	12
3.2.3 Zásady ustavení	13
3.3 Opěrné prvky.....	14
3.3.1 Vnější opěrné prvky	14
3.4 Upínací zařízení	16
3.4.1 Mechanická upínací zařízení	17
3.4.2 Pneumatická a hydraulická upínací zařízení	19
3.4.3 Další upínací zařízení	19
3.5 Způsoby vyrovnání přípravku.....	20
3.6 Druhy a rozdělení přípravků	21
3.6.1 Stavebnicové přípravky.....	21
3.7 Rozdělení měřicích přípravků.....	22
3.7.1 Měřicí přípravky určené pro CMM.....	22
3.7.2 Kontrolní přípravky.....	22
3.7.3 Kontrolní Go/No Go kalibry	22
3.7.4 Cubingové přípravky.....	23
3.8 Materiály a povrchové úpravy vhodné pro přípravky.....	24
4 PŘEHLED METROLOGICKÝCH SYSTÉMŮ	26
4.1 Souřadnicové měřicí stroje.....	26
4.1.1 Stacionární CMM.....	26
4.1.2 Mobilní CMM	28
5 METROLOGICKÉ SYSTÉMY FIRMY DOOSAN BOBCAT EMEA S.R.O.	29
5.1 DEA Alpha 2.0.....	29
5.2 TIGO SF.....	30

5.3	Měřicí rameno Absolute Arm 8530	31
6	PRAKTICKÁ ČÁST	33
6.1	Vnější kryty rypadla.....	33
6.2	Představení původního přípravku	36
6.2.1	Rozměrová kontrola původního přípravku	37
6.3	Konstrukční návrh rozšiřujících částí přípravku.....	37
6.3.1	Konstrukční předpoklady a specifikace	38
6.3.2	Technologické a materiálové požadavky	39
6.3.3	Postup návrhu přípravku	39
6.3.4	Pevnostní kontrola.....	42
6.3.5	Výkresová dokumentace	45
6.4	Finální návrh částí přípravku	46
6.4.1	Rozměrová kontrola částí přípravku	48
6.5	Sestava kompletního přípravku.....	49
6.5.1	Postup montáže	49
6.5.2	Rozměrová kontrola a kalibrace přípravku	50
6.6	Ověření funkčnosti přípravku	54
6.6.1	Montáž krytů	54
6.6.2	Postup měření krytů	55
6.6.3	Výsledky měření	57
6.7	Ověření způsobilosti	59
6.8	Využitelnost měřicího přípravku	61
6.8.1	Kontrola mezer a přesahů (Flush&Gap)	61
6.8.2	Kontrola rozměrové kvality krytů.....	61
6.9	Ekonomická analýza	62
7	ZHODNOCENÍ	63
7.1	Finální optimalizace.....	64
7.1.1	Optimalizace vyrovnání přípravku.....	64
7.1.2	Úprava kritických částí přípravku	65
8	ZÁVĚR.....	67
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	71
	SEZNAM TABULEK	73
	SEZNAM PŘÍLOH.....	74

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka / symbol	Význam	Jednotka
2D	Dvojměrný (Two Dimensional)	-
3D	Trojměrný (Three Dimensional)	-
CAD	Konstruování podporované počítačem (Computer Aided Design)	-
CAM	Výroba podporovaná počítačem (Computer Aided Manufacturing)	-
CMM	Souřadnicový měřicí stroj (Coordinate Measuring Machine)	-
C_g	Index způsobilosti	[1]
DMIS	Dimensional Measuring Interface Standard	-
E	Modul pružnosti v tahu	[GPa]
$E_{0,MPE}$	Maximální chyba měření (Maximum permissible error)	[μm]
GD&T	ISO kótování a tolerance (Geometric Dimensioning and Tolerancing)	-
R&R	Opakovatelnost a reprodukovatelnost (Reproducibility & Repeatability)	-
RPS	Systém referenčních bodů (Reference Point System)	-
s_g	Směrodatná odchylka	[mm]
SMS	Souřadnicový měřicí stroj	-
STL	Stereolitografie	-
SSA	Přesnost celého skenovacího systému	[μm]
SW	Software	-
\bar{x}_g	Aritmetický průměr	[mm]

1 ÚVOD

V současné době se díky rozvoji automatické výroby a kontroly součástí využívá stále více přípravků, které slouží nejen pro realizaci měření, ale i kontrolu smontovatelnosti a rozměrové kvality. Cílem této diplomové práce je navrhnout měřicí přípravek pro vnější kryty rypadla Bobcat E50z, který bude určen pro realizaci měření těchto krytů, kontrolu jejich smontovatelnosti a také pro ověření rozměrové kvality jednotlivých vyrobených krytů. Motivací pro návrh tohoto typu přípravku byly vysoké požadavky na přesnost ustavení krytů a na celkový vzhled stroje. Vizuální kvalita stroje se stává čím dál více důležitou až kritickou pro oslovení zákazníka, a proto i tyto designové součásti musí být pravidelně kontrolovány a případně optimalizovány.

Obsahem první části diplomové práce je rozbor zásad pro návrh přípravků a požadavků na jeho konstrukci. Obecně jsou zde popsány způsoby ustavení těles v prostoru a konstrukční prvky, které k tomu lze využít. Do této části spadají především opěrné prvky a upínací zařízení. Dále práce popisuje jednotlivé typy měřicích přípravků a jejich využitelnost. Další kapitola se zaměřuje na přehled měřicích systémů, včetně popisů strojů, kterými firma Doosan Bobcat EMEA s.r.o. disponuje a jsou využity v praktické části.

V praktické části této diplomové práce je popsán postup návrhu měřicího přípravku až do jeho finální podoby. Další kapitola se zabývá jeho sestavením a rozměrovou kontrolou, včetně kalibrace. V poslední kapitole je provedena rozměrová kontrola vnějších krytů rypadla s využitím přípravku pomocí skenovací metody.

2 SPOLEČNOST DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o.

Společnost Doosan Bobcat EMEA s. r. o. se řadí mezi největší světové výrobce v oblasti produkce kompaktních strojů a zařízení určených pro stavební průmysl. Do širokého portfolia výrobků se řadí především smykem řízené a kolové nakladače, rypadla, teleskopické manipulatory a také pestrá nabídka příslušenství a zařízení.

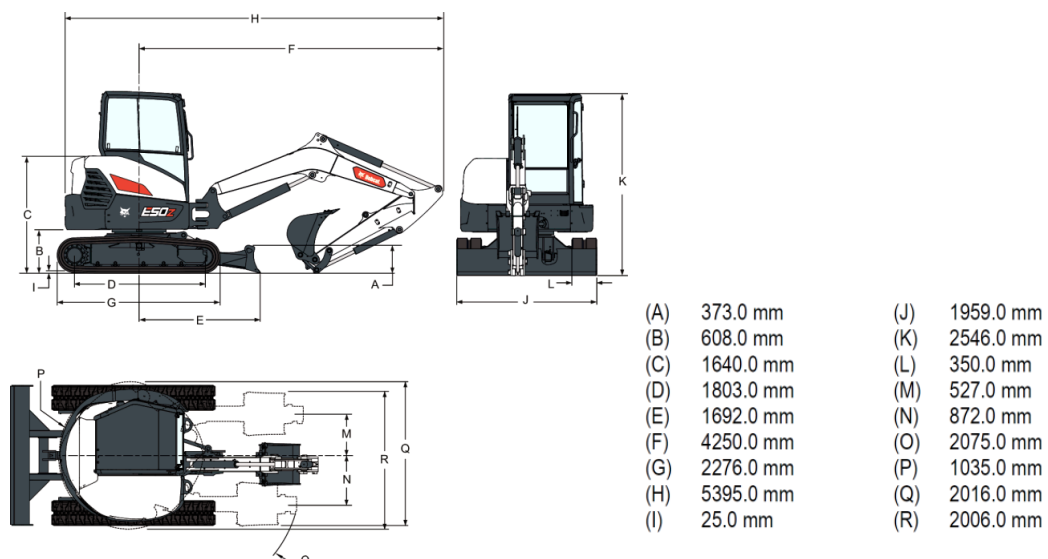
2.1 Kompaktní rypadlo E50z

Stroj firmy Bobcat s označením E50z se řadí do třídy pěti-tunových kompaktních rypadel nové generace viz obr. 2-1. Mezi nové vlastnosti stroje patří zlepšení práce v přímé blízkosti stěn a jiných překážek. Kabina a podvozek stroje jsou navrženy tak, aby kabina při otáčení nepřesahovala v žádné poloze šířku podvozku. Tím se značně zvyšuje flexibilita, produktivita a bezpečnost práce v okolí objektů. [1]



Obr. 2-1 – Rypadlo Bobcat E50z [2]

Rypadlo pohání dieselový motor o výkonu 31,3 kW. Stroji poskytuje kopací sílu až 37 744 N a jeho maximální rychlost dosahuje 5,5 km/h. Rozměry stroje (obr. 2-2) a především jeho dlouhý výložník s ramenem umožňují kopání až do hloubky 3,55 m. Ke stroji lze připojit desítky různých příslušenství, s jejichž pomocí lze rypadlo využívat na široký rozsah úkonů. [1; 3]



Obr. 2-2 – Rozměry rypadla Bobcat E50z [3]

3 PŘÍPRAVKY

3.1 Význam přípravků v technické praxi

Přípravky jsou v technické praxi konstruovány především za účelem držení, lokalizace a podepření součásti během obrábění, montáže, svařování, kontroly či jiného výrobního procesu. Jejich primárním úkolem je umístění dílu do přesně definované polohy, kterou daný proces vyžaduje. Konstrukce přípravku musí poskytovat dostatečnou upínací sílu, která může být vyvozena mechanicky, hydraulicky, pneumaticky nebo elektrinou.

Dle anglické terminologie se rozlišují dva druhy přípravků. Prvním typem („fixture“) se rozumí přípravek sloužící především pro zajištění referenční polohy součásti během výrobního procesu (např. poloha vůči nástroji). Stejně jako první typ, také druhý typ přípravku („jig“) poskytuje držení, podepření a umístění součásti. Navíc však zajišťuje funkci vedení řezného nástroje během procesu obrábění. Nejčastěji se setkáváme s vrtacími přípravky pro vedení vrtáku, výstružníku a dalších rotačních nástrojů.

Konstrukční návrh přípravků ovlivňuje nespočet faktorů. Po mechanické stránce musí přípravek poskytovat dostatečnou pevnost a tuhost pro podepření součásti, aby nedošlo k deformaci a prohýbání konstrukce. V případě obráběcích přípravků musí konstrukce odolávat také řezným silám a vibracím během procesu obrábění.

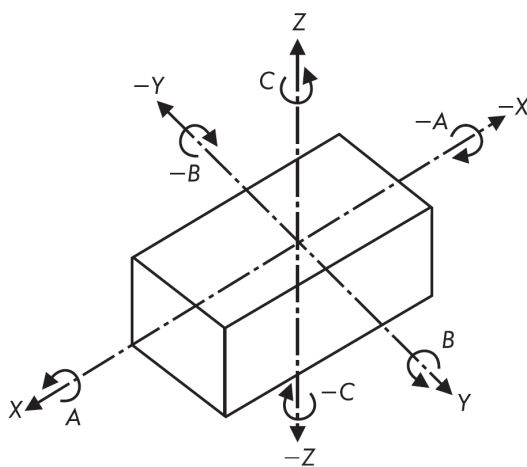
Průmyslové přípravky pomáhají především ke snížení vlivu lidského faktoru ve výrobním procesu a usnadňují práci pracovníkům, kteří se tak obejdou bez složitého zaškolení. Nižší požadavky na pracovníky vedou zároveň k dalším úsporám. Aplikace přípravků ve výrobě přináší zlepšení jakosti výrobku a zvýšení pracovního výkonu. Některé operace dokonce nemohou být realizovány bez jejich použití. Typ konstrukce přípravku závisí především na druhu výroby a účelu, ke kterému slouží.

V oblasti metrologie se čím dál častěji setkáváme s komplexními kontrolními přípravky. Ty mohou být navrženy pro kontrolu pouze jediné součásti, nebo naopak i pro kontrolu celých sestav jako jsou karoserie v automobilovém průmyslu. Tyto přípravky jsou obvykle stavebnicové a při jejich tvorbě se využívají nejpokročilejší součástky a technologie.

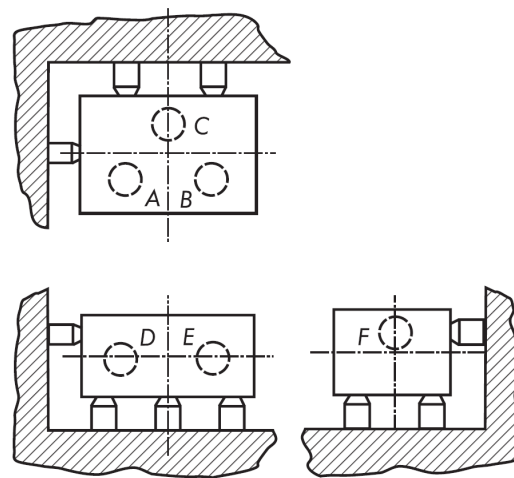
3.2 Ustavení těles v prostoru

3.2.1 Princip jednoznačného ustavení

Každé těleso v prostoru, a tedy i součást v přípravku má šest stupňů volnosti. Na základě kartézského souřadnicového systému hovoříme o třech posuvných pohybech ve směru os x , y , z a o třech rotačních pohybech kolem těchto os. Pro jednoznačné uložení součástí v přípravku je tedy nutné omezit všechny stupně volnosti a zabránit tak jejímu pohybu. Toho je v praxi dosaženo postupnou eliminací stupňů volnosti za použití opěrných prvků, jejichž souhrn je uveden v následujících oddílech kapitoly. [4; 5]



Obr. 3-1 – Stupně volnosti tělesa [5]



Obr. 3-2 – Metoda ustavení 3-2-1 [5]

Pokud uvažujeme kvádr v prostoru, jeho šesti stupňům volnosti odpovídá dvanáct (pozitivních i negativních) směrů pohybu viz obr. 3-1. Pro správné zamezení těchto pohybů se využívá metoda ustavení 3-2-1. Princip této metody nejlépe popisuje obr. 3-2 znázorňující ustavení pomocí šesti opěrných čepů (A až F). Pohyb kvádrů je omezen v devíti směrech díky kombinaci tří opěrných bodů v základní vodorovné rovině, dvou bodů ve svislé rovině a jednoho bodu v rovině kolmé na tyto roviny. Zbývající tři směry mohou být dodatečně omezeny pomocí různých variant upínacích prvků až po samotném usazení dílu. Tyto prvky vyvodí upínací sílu do opěrných čepů, čímž dojde k úplnému zamezení pohybu kvádrů. [4; 5]

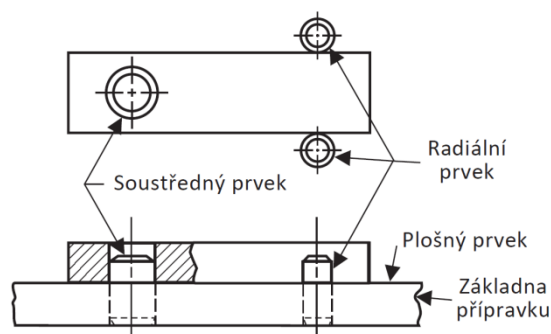
3.2.2 Druhy ustavení

Princip ustavení součásti závisí především na charakteru součásti (tvar, rozměry a další) a na požadavcích výrobní operace, pro kterou je přípravek určen. Rozlišujeme tři

základní kategorie ustavení součásti, avšak většina přípravků využívá jejich vzájemnou kombinaci pro dosažení nejlepšího výsledku. [4; 5]

- a) **Plošné** – nejběžnější ustavení využívající opření o povrch součásti (hladká plocha, i povrch nepravidelného tvaru).
- b) **Soustředné** – ustavení na základě soustřednosti ploch (vnitřní nebo vnější průměr).
- c) **Radiální** – ustavení omezující otáčení (doplňk k soustřednému uložení).

Kombinace plošného, soustředného a radiálního ustavení, zobrazená na obr. 3-3, odebírá součásti všech 6 stupňů volnosti. Součást založená v tomto typu přípravku se může pohybovat pouze v pozitivním směru svislé osy, který slouží k jejímu vyjmutí. Gravitační síla působící v negativním směru však zajišťuje přítlak do základní plochy. Výhoda tohoto ustavení spočívá v redukci počtu upínacích zařízení v případě nutnosti úplného zamezení pohybu součásti. [5]



Obr. 3-3 – Ustavení součásti [5]

3.2.3 Zásady ustavení

Pro zajištění správné funkce přípravku musí navržené opěrné prvky splňovat vyhovující umístění, rozměry a především vhodný návrh dle požadavků dané aplikace. Celkový návrh opěrných prvků je nutné provést s ohledem na snadné založení a vyjmutí součásti z přípravku a na přístupnost nástroje k požadovaným oblastem součásti. [5]

Navržené umístující a podpěrné prvky by měly být vždy v kontaktu s pevným a stabilním bodem na součásti. Takové body se nachází především na obrobených plochách, které zajistí vyšší přesnost umístění dílu než plochy neobrobené. Pro dosažení stabilní polohy je vhodné volit co největší vzájemnou vzdálenost opěrných bodů na daném povrchu součásti. [5]

Počet potřebných bodů závisí na charakteru a složitosti součásti. Pro dosažení stabilního usazení by se jich však nemělo volit více než je nutné. Metoda ustavení 3-2-1 stanovuje minimální potřebný počet opěrných bodů na šest. Každý nadbytečný opěrný bod může vést k narušení jednoznačného umístění součásti a tím i ke zhoršení funkčnosti přípravku. Použitím více opěrných prvků dochází také k růstu nákladů. Více opěrných

bodů se tedy doporučuje volit s opatrností a pouze v odůvodněných případech za účelem zlepšení vlastností přípravku. [5]

Každé umístění součásti v přípravku se pohybuje v určité toleranci. Volba tolerance umístění by se měla pohybovat mezi 20 až 50 % tolerance dané součásti. Nadměrně velká tolerance má za následek snížení životnosti přípravku a přináší rizika. Nepřiměřeně úzká tolerance vede především k nárůstu výrobních nákladů, a proto je nutné při návrhu přípravku hledat optimální rovnováhu mezi požadovanou přesností a cenou. [5]

3.3 Opěrné prvky

Opěrné prvky slouží k zamezení pohybu součásti a udávají její jednoznačnou polohu. Ta musí být trvale přesná a odolná vůči otěru. Vnější opěrné prvky slouží k ustavení součásti pomocí jejích vnějších ploch. Obdobně vnitřní opěrné prvky využívají vnitřních ploch k ustavení dílu, především kruhových otvorů. V současné době se tyto prvky komerčně vyrábějí a prodávají v nejrůznějších tvarech a velikostech, s širokými možnostmi konfigurace. [4; 5]

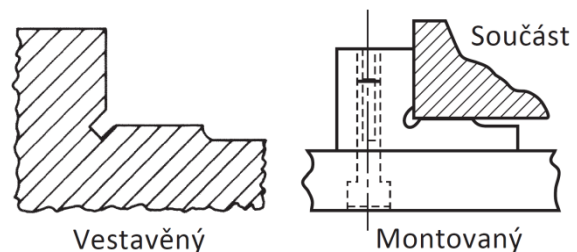
3.3.1 Vnější opěrné prvky

Vnější opěrné prvky lze rozdělit na lokátory, které omezují pohyb ve vodorovné rovině, a na podpěry zamezující pohybu směrem dolů (podepírají součást z její spodní strany). Opěrné prvky se dále rozdělují dle možnosti jejich nastavitelnosti na:

- a) Pevné – poskytují pouze jednu fixní polohu součásti
- b) Nastavitelné – nabízejí možnost nastavení polohy opěrného bodu prvku [4; 5]

a) Pevné opěrné prvky

Pevné, nenastavitelné prvky zajišťují pouze jednu pevně danou polohu opěrného bodu. Tento kontaktní bod mezi přípravkem a součástí je stálý a nelze jej přenastavit do jiné polohy. Mezi tyto prvky patří opěrné čepy, vestavěné a montované



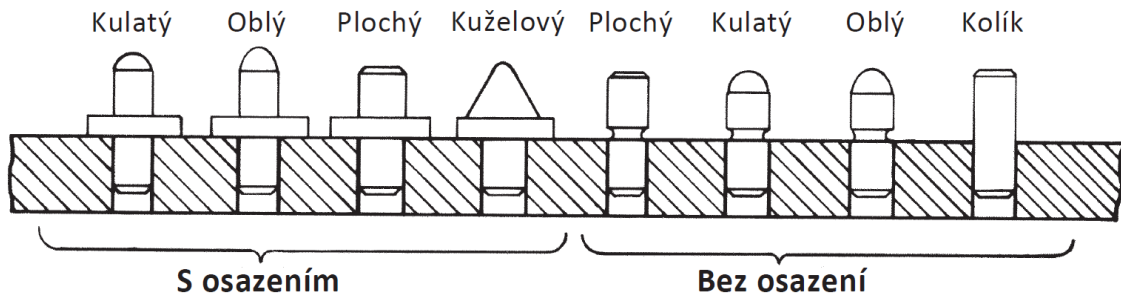
Obr. 3-4 – Vestavěný a montovaný opěrný prvek [5]

rovinné a tvarové opěry (obr. 3-4) a prizmatické opěry. Pevné opěry zajišťují vyšší stabilitu upnutí než podpěry nastavitelné, a proto by právě ony měly zachycovat vnější sílu (např. sílu od rezného nástroje) působící na upnutou součást v přípravku. [4; 5]

Opěrné čepy

Dosedací a opěrné plochy těchto čepů mohou být kulovité nebo ploché. Životnost především rovinných ploch lze prodloužit aplikací čepů s vyměnitelnými vložkami např. z karbidů. Na obr. 3-5 jsou znázorněny pevné opěrné čepy s a bez osazení. [4; 5]

Opěrné lišty



Obr. 3-5 – Pevné opěrné čepy [5]

Tyto opěry slouží k ustavení velkých a těžkých součástí, které by svou tíhou mohly zdeformovat menší opěrné čepy. Z důvodu větší kontaktní plochy mezi lištou a součástí musí být dosedací povrch součásti obrobena přesně. Také se doporučuje používat lišty krátké a úzké, které zajistí kvalitnější dosednutí součásti. Opěrné lišty jsou obvykle kalené a broušené. [4]

Prizmatické podpěry

Prizmata slouží k podepření válcových součástí mezi dvěma šikmými plochami. Tyto plochy obvykle svírají úhel mezi 60° a 120°. Tento typ opěr určuje polohu součásti nejen výškově, ale také stranově, čímž rostou nároky na přesnost jejich polohy na samotném tělese přípravku. V případě ustavení součásti za neobrobenou plochu (např. odlitek s technologickým úkosem) lze využít prizma s odkloněnými plochami, ve kterých dojde pouze k dvoubodovému opření [4; 5].

Válcové opěry

Středící válcové opěry slouží k uložení součástí s přesnou dírou. Volba průměru a délky těchto středících čepů závisí na výrobních úchylnkách díry. Vůle mezi dírou a čepem snižuje přesnost polohy. Hrana válcové opěry by měla být značně sražena či zaoblena pro snadné navádění do otvoru. [4]

Středící čepy

Obdobnou funkci jako válcové opěry plní také středící čepy. Obvykle se využívají pro součásti s jedním či dvěma přesnými otvory. V tělese přípravku mohou být buďto

zalisovány, nebo uloženy posuvně se zajištěním jejich polohy. Okolí čepu slouží jako pevná dosedací plocha. Ta může být realizována přímo na tělese přípravku nebo jako nákrůžek daného čepu, případně samostatný kroužek. Primárně se volí dosedací plochy vyměnitelné. [4]

b) Nastavitelné opěrné prvky

Nastavitelné opěrné prvky se využívají v kombinaci s prvky pevnými, které pro ně představují referenční polohu. Nastavitelnost polohy opěrného bodu poskytuje možnost usazení součástí s proměnlivými rozměry. Jedná se především o součásti s hrubým povrchem (odlitky) nebo o sérii výrobků stejného typu, ale odlišných rozměrů. Značná většina přestavitelných podpěr využívá ke změně své výšky princip šroubu a matice. [4]

Mezi nastavitelné opěrné prvky lze zařadit i pomocné, samostavitelné opěry. Ty fungují na principu pružných prvků, které přizpůsobí polohu opěrné části vůči upnutému dílu. Využívají se v případě, kdy již prostorově určená součást vyžaduje další opěrné body pro vyšší stabilitu. [4]

3.4 Upínací zařízení

Poloha součásti v přípravku se zajišťuje pomocí ustavujících prvků. Dosažení stálého styku součásti s těmito opěrnými plochami však vyžaduje její upnutí. Aby se zabránilo změně polohy součásti vlivem působení řezných či jiných sil, kterým je upnutá součást při daném procesu vystavena, musí být přípravek opatřen upínacím systémem. Ten má za úkol vyvodit dostatečné upínací síly zabraňující vychýlení součásti. [4]

Některé upínací mechanismy mohou mít funkci ustavovací i upínací. Do této skupiny patří různé trny, kleštiny, prizmata a jiné části přípravků. Výjimečně se přípravky obejdou i bez přídavných upínacích sil, například v případě těžkých součástí, jejichž ustavení malé vnější síly nenaruší. [4]

Volbu upínací síly ovlivňuje velký počet faktorů, a proto každý návrh vyžaduje rozbor procesu a analýzu parametrů vnějších sil - jejich velikost, směr a působiště. V případě procesu obrábění je nutné vzít v úvahu také kmitavý pohyb a rázový nárůst řezných sil. Další minoritní síly mohou vznikat od hmotnosti součásti, například od jejího ustavení ve svislé nebo jiné nestabilní poloze. Při určitých procesech je vhodné nezanedbat také síly vzniklé vlivem změny teploty, pružicí, třecí a také odstředivé síly. [4; 5]

Návrh upínání by měl poskytovat co největší velikost upínacích sil, které však mají omezení. Během upnutí nesmí dojít k deformaci dílu a také samotný přípravek musí být na tuto sílu dimenzován a poskytovat dostatečnou tuhost. Upínací prvky zároveň nesmí omezit přístup nástroje k plochám, u kterých je přístup vyžadován. [4]

3.4.1 Mechanická upínací zařízení

a) Šroub a matice

Mezi nejčastější způsoby upínání patří šroub a matice. Jejich výhoda spočívá v dosažení velkých upínacích sil, jednoduchosti, univerzálnosti a také v samosvornosti. V případě velkých zdvihů však může být jejich používání zdlouhavé. [4]

Šroub může na upínanou součást působit přímo svým koncem nebo nepřímou pomocí pákového mechanismu. V obou případech je doporučeno, aby v kontaktu s povrchem dílu byla vyměnitelná část, která při upínání nezpůsobí jeho poškození. Tou může být například otočná podložka upevněná na konci šroubu. Běžně se setkáváme se šrouby s kulovým zakončením, které poskytují podložce možnost náklonu. [4]

Šrouby a matice sloužící k upínání se vyrábějí v nepřeberném množství variant. Rukojeť těchto prvků musí zajišťovat snadné a rychlé ruční upínání pro minimalizaci vedlejších časů. Rukojeť šroubů je obvykle opatřena dlouhou tyčí, která usnadňuje ruční šroubování. Matice se obvykle vyrábí se zvětšenou ergonomickou rukojetí ve tvaru hvězdy nebo válcovitého tvaru s vroubkovaným povrchem. [4]

Výjimečně se také aplikují šrouby s běžnou hlavou pro klíče, stejně tak matice. Použití klíčů se však nedoporučuje a mělo by být voleno jen v případě omezeného manipulačního prostoru. Za účelem odstranění nevýhody zdlouhavého ručního upínání se využívají speciálních rychloupínacích šroubů a matic. [4; 5]

b) Výstředník

Na rozdíl od šroubů poskytuje výstředník mnohem rychlejší působení upínací síly, nevýhodou je však jejich malý pracovní zdvih. Průběh zdvihu přímo závisí na úhlu pootočení výstředníku kolem své osy. Maximální zdvih určuje dvojnásobná hodnota výstřednosti, kterou lze dosáhnout pootočením o 180°. Výstředník převážně slouží k upínání součástí s malými rozměrovými úchytkami, které zdvih dokáže zahrnout. [4]

Výstředník musí splňovat podmínku samosvornosti v každé upínací poloze. Existuje několik druhů výstředníků na základě jejich tvaru. Běžně jsou s tvarem jednoduchým, ve složitějších aplikacích lze využít tvar s dvojitou výstředností, který umožňuje větší

zdvih a jeho speciální průběh. Většina výstředníků zajišťuje upínací sílu tlakem, existují však řešení, kdy na součást působí tahová síla. [4]

Celkové konstrukce zahrnuje výstředník s pevně připevněnou pákou pro ruční ovládání. Kromě toho, že upínací síla obvykle působí tlakem, existují i výstředníky založené na upínání tahem. [4]

c) Vačky

Funkčnost vaček je založena na obdobném principu jako u výstředníků. Jejich obvodovou křivkou však může být libovolná křivka, která dokáže splnit podmínku samosvornosti během upnutí. Nejčastěji se používají vačky, jejichž křivku popisují matematické spirály a mohou být vyjádřeny v polárních souřadnicích. Mezi takové křivky patří například Archimédova spirála a Logaritmická spirála. [4]

d) Klínové mechanismy

Klín lze definovat jako vačku s nekonečně velkým poloměrem. Tyto mechanismy se řadí mezi jednoduchá řešení upínání, neboť se snadno vyrábějí, dosahují malých rozměrů a poskytují změnu směru upínací síly vůči síle ovládací. Zásadní nevýhodou klínů jsou velké třecí ztráty vznikající na jejich styčných plochách. [4]

e) Pákové mechanismy

Páky v kombinaci s dalšími upínacími prvky poskytují možnost měnit snadno velikost i směr upínací síly vůči síle ovládací. Dvouramenné pákové mechanismy fungují na principu páky umístěné na otočném čepu. Na jedno rameno působí síla ovládací, která vyvolává sílu upínací na druhém rameni. Složitějším pákovým systémem upínání jsou kloubové zesilovací mechanismy, kterými lze značně zvětšit upínací sílu použitím většího počtu pák. [4]

f) Upínky

Upínky jsou dvouramenné páky umožňující přenos upínací síly do vhodného místa na upínané součásti. Ovládací síla je vyvolána osovou silou ve šroubovém spoji, která přes opěrný prvek vyvolává upínací sílu v místě dotyku se součástí. Upínka pak odpovídá modelu zatíženého nosníku o dvou podpěrách. Změnou polohy šroubu či opěrného prvku lze měnit velikost upínací síly. Mezi běžné upínky patří upínky sedlové, ve tvaru U a zahnuté. Pro usnadnění vyjímání a zakládání součástí se využívají upínky odklápěcí. [4]

g) Pákové svěrky

Tyto pákové mechanismy mají proměnný zdvih, díky kterému jsou schopny přitlačit součást k opěrným bodům velkou silou. [4]

3.4.2 Pneumatická a hydraulická upínací zařízení

Pro zvýšení produktivity práce, zjednodušení nároků na obsluhu a zlepšení způsobu upínání se ruční mechanismy nahrazují pneumatickými či hydraulickými systémy. Ty přinášejí možnost mechanizace a automatizace do výrobního procesu, která je důležitá pro sériovou výrobu. [4]

a) Vzduchové servomotory

Mezi běžné vzduchové servomotory patří pístové, lopatkové a membránové. Jejich činnost se nahrazuje ruční silou a značně snižují vedlejší časy upínání. Upínací síla je dána tlakem působícím na píst a dosahuje značně vyšších hodnot oproti ručnímu upínání. Její velikost lze velmi snadno regulovat a také kontrolovat během procesu pomocí ventilů a senzorů. Součásti potřebné k jejich provozu jsou těsnění, vzduchový filtr, redukční ventil, maznice a řídicí ventily. Ty zajišťují správný a spolehlivý chod, který vyžaduje konstantní tlak a čistotu vzduchu. [4]

b) Hydraulické servomotory

Stejně jako vzduchové servomotory i ty hydraulické přinášejí stejné výhody pro upínání součástí. Navíc však poskytují vyšší tlaky při menších rozměrech zařízení, neboť hydraulické válce vyžadují mnohem menší průměry při uvažování stejné upínací síly. Jedná se však o složitější a dražší zařízení, které pracuje s nižšími provozními rychlostmi. Zjednodušený hydraulický okruh vyžaduje čerpadlo sloužící k dopravě stálého množství hydraulického oleje z nádrže, zpětný ventil, rozvaděč, servomotor (hydraulický válec) a přepouštěcí ventil pro ochranu. [4]

Hydraulický okruh v přípravku musí udržovat stálý tlak během upnutí, poskytovat dostatečnou upínací sílu, pracovat rychle a plnit správnou funkci ustavovacích prvků, které jsou spojené se servomotorem. [4]

3.4.3 Další upínací zařízení

Pro upínání součástí se kromě výše uvedených způsobů používají také zařízení fungující na odlišných principech. Můžeme se setkat s elektromechanickými servomotory, které

se využívají například u sklíčidel. Elektromotor otáčí mechanické součástky (obvykle ozubená kola), které ovládají čelisti, a tím upnutí součásti. [4]

Další způsoby upnutí využívají elektromagnetismus a magnetismus. Elektromagnetické desky a sklíčidla se používají především pro broušení. Upínací zařízení s permanentním magnetem nevyžadují přívod elektrické energie a magnetické pole se ovládá prepínačem. Tyto způsoby se využívají pro ocelové součásti, avšak s pomocí magnetických pomůcek lze upnout i nemagnetické součásti. [4]

3.5 Způsoby vyrovnání přípravku

Každý přípravek vyžaduje přítomnost vyrovnávacích elementů pro vytvoření referenčního souřadnicového systému. Ten slouží k zajištění seřízení přípravku a pro jeho pravidelná ověřování přesnosti. Toto vyrovnání mohou tvořit geometrické prvky nebo alespoň 3 prostorové body. Jednotlivými variantami jsou:

- Obrobené plochy na tělese přípravku
- RPS elementy měřené součásti
- Přesné kulové součásti připevněné k tělesu
- Broušená ocelová pouzdra zapuštěná do tělesa [6]

Z metrologického hlediska je vyrovnání na geometrické prvky pravděpodobně tím nejlepším. Jedná se o velmi přesné zarovnání, ale také o nejsložitější a nejdražší. Jako nejběžnější řešení se však využívá systém založený na třech usazených kalených pouzdech. Toto řešení poskytuje vysokou přesnost vyrovnání blízkou tomu teoretickému za přijatelnější náklady. Stejným způsobem jako pouzdra lze využít kulové a jiné artefakty, které svým změřením vyjadřují také jeden konkrétní bod. [6]

Vyrovnání součásti v přípravku

Jako nejčastější vyrovnání měřené součásti se používá její RPS systém. Ten se do přípravku vnáší v podobě návrhu správného ustavení založeném přímo na prvcích definující RPS součásti. Například u součásti využívající k vyrovnání otvory se pro docílení co nejpřesnější polohy v přípravku využívají kuželové, zatahovací středící prvky, které absorbují vůli těchto referenčních prvků. Tímto řešením se zajistí opakovatelnost měření v přípravku a velmi dobré výsledky v R&R analýzách. [6]

3.6 Druhy a rozdělení přípravků

Přípravky rozlišujeme dle použitelnosti:

- a) univerzální – svěráky, sklíčidla, upínky
- b) stavebnicové – sestavují se z typizovaných součástí
- c) pro určitou skupinu součástí – tvarově podobných
- d) jednoúčelové – slouží pouze pro konkrétní proces [7; 8]

Dále pak podle funkce na:

- a) kontrolní
- b) montážní
- c) operační
- d) měřicí [7; 8]

3.6.1 Stavebnicové přípravky

Typizované součásti stavebnicových sad slouží k jednoduché výrobě přípravků metodou spojování těchto součástí. Stavebnicové přípravky nabízejí výhodu v podobě minimalizace výroby jednoúčelových součástí. Po ukončení využitelnosti přípravku se typizované součásti demontují a lze je použít pro stavbu nového přípravku.

Jednotlivé části stavebnicových přípravků se rozdělují na:

- **Základové** - základové desky, úhelníky
Všechny základové desky (obdélníkové, kruhové) jsou opatřeny prvky pro spojení dalších částí. Těmi mohou být T drážky pro šrouby, závitové otvory.
- **Opěrné** - podložky, opěry, prizmata, lišty
Po připevnění k základovým částem tvoří rám přípravku s opěrnými plochami v potřebných polohách.
- **Ustavovací** - ustavovací a středící čepy, kolíky
Slouží k ustavení součástí a zajištění vzájemné polohy všech prvků přípravku.
- **Upínací** - různé druhy upínek, výstředníky, rukojeti
- **Spojovací** - různé druhy šroubů, matic a podložek
- **Vodicí** - vrtací pouzdra, hřídele. [4; 9]

3.7 Rozdělení měřicích přípravků

3.7.1 Měřicí přípravky určené pro CMM

Přípravky navržené pro souřadnicové měřicí stroje využívají stejných principů upnutí součásti jako kontrolní přípravky. Jako vyrovnání součásti pro realizaci měření se využívá její RPS systém. Tento typ přípravků nevyužívá žádné měřicí prvky poskytující informace o součásti hned při jejím založení. Přípravek slouží pouze k zajištění správného upnutí součásti. Veškerá data o rozměrech součásti jsou získána až po provedení měření na SMS. [6; 10]



Obr. 3-6 – Kontrolní přípravek pro CMM [10]

3.7.2 Kontrolní přípravky

Kontrolní přípravky slouží k rozměrové kontrole sériově vyráběných součástí se zaměřením na provádění opakovatelné a přesně definované kontroly, kterou neovlivňuje lidský faktor v podobě změny obsluhy přípravku. To zajišťuje správné vyrovnání součásti v přípravku. Každý zakládací přípravek se využívá ke kontrole konkrétní komponenty, a to dvěma metodami. [6; 10]

3.7.3 Kontrolní Go/No Go kalibry

Jedná se o kontrolní měřicí přípravky, tzv. kalibry, skládající se ze dvou měřicích částí a rukojeti. Jeden měřicí prvek odpovídá maximální hodnotě měřeného rozměru dle specifikace (No Go), druhý prvek pak minimální hodnotě (Go). Kalibry se využívají pro ověření velikosti průměrů otvorů, speciálních tvarů a také ke kontrole mezer a vůlí. [6]

3.7.4 Cubingové přípravky

Tzv. Cubing a Meisterbock přípravky se používají především v automobilovém průmyslu pro vyhodnocení kvality a preciznosti všech částí automobilu, jako je karosérie, dveře, kryty a další součásti podílející se na celkovém vzhledu automobilu. S jejich pomocí se vyhodnocuje a následně optimalizuje preciznost jednotlivých částí a podsestav už od předvýrobní fáze výroby. Před začátkem sériové produkce výrobků se během výroby prvních kusů vyhodnocuje vzájemná smontovatelnost a kvalita jednotlivých komponent. Po schválení zahájení výroby lze přípravek využít pro pravidelné kontroly součástí nebo pro optimalizaci procesu montáže dílů do sestav, neboť na přípravku lze simulovat úkony prováděné na výrobní lince. [11]

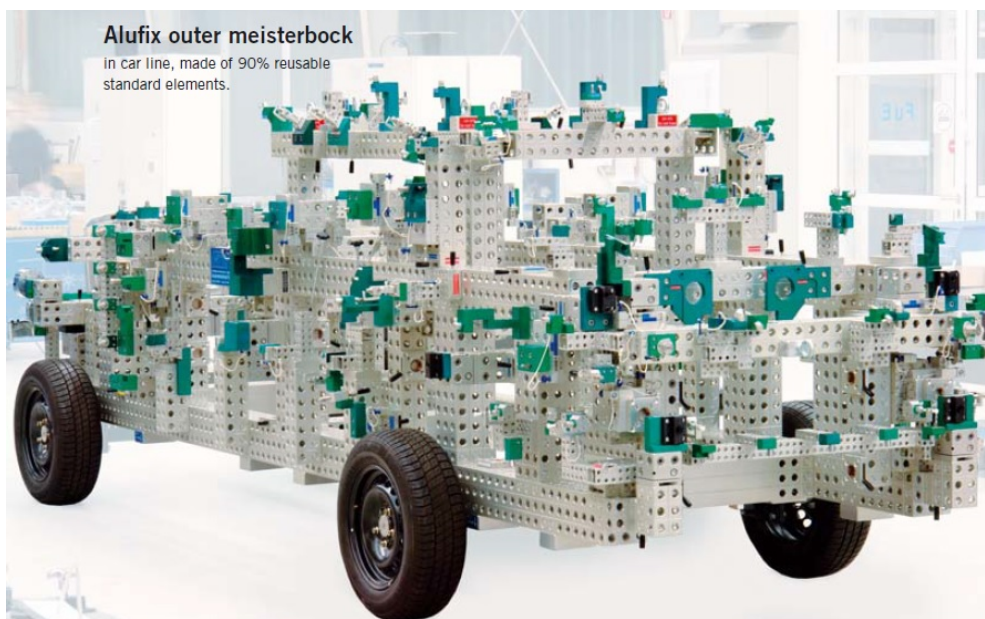
Označení Meisterbock se používá pro teoretickou a velmi přesnou reprodukci montážního procesu automobilu. V počátcích svého vzniku se tento typ přípravků využíval především pro analyzování a zkvalitnění výrobních procesů, především na svařovací lince. Následně se hlavním cílem Meisterbocku stalo sledování geometrických podmínek montážních procesů. Ten je totiž navržen a vyroben pro zajištění montáže všech komponent, které jsou v něm podrobeny rozměrové kontrole [6; 10; 12]

Při návrhu Meisterbocku se obvykle využívá konstrukce sestavená z modulárních systémů. Základní stavebnicové prvky jako modulární tyče poskytují vysokou tuhost, rozměrovou přesnost a jsou opatřeny geometrickými a mechanickými prvky pro snadné připojení dalších součástí. Po splnění své funkce a ukončení výroby se takový přípravek může rozebrat a určité části znovu použít. [6; 9; 10]

Proces osazení přípravku simuluje skutečný výrobní cyklus a je realizován pomocí upevňovacích systémů, středících čepů, nastavitelných vložek a dalších prvků. [9]

Pro přehlednost lze Meisterbock označit na základě určení a upínaných komponent. Mezi vybrané typy konstrukcí:

- **FMB - Fugemeisterbock:** konstrukce pro kompletní karosérii s podvozkem
- **AMB - AussenMeisterbock:** konstrukce pro vnější součásti "body in white" jako jsou dveře, nárazníky a světlá
- **SMB - SideMeisterbock:** konstrukce pro vnější boční součásti
- **Mini-Meisterbock:** konstrukce určená především pro konkrétní komponenty [9]



Obr. 3-7 – Vnější Meisterbock [12]

3.8 Materiály a povrchové úpravy vhodné pro přípravky

Volba materiálu přípravku je jeden z nejdůležitějších kroků při jeho návrhu a výrobě. Každý materiál se vyznačuje odlišnými fyzikálními, mechanickými, chemickými i technologickými vlastnostmi, které značně ovlivňují vhodnost jeho aplikace pro daný typ přípravku.

a) Fyzikální vlastnosti

Z fyzikálních vlastností je nutné brát v úvahu především hustotu materiálu, která může vést ke zvýšení hmotnosti celého přípravku a omezit tak možnost jeho manipulace. Pro každý přípravek obecně platí pravidlo minimalizace objemu, čímž lze docílit nižší hmotnosti a také nákladů spojených s cenou materiálu. Omezujícím faktorem je však pevnost a tuhost přípravku.

Teplotní roztažnost materiálu patří mezi vlastnosti, které se významně podílejí na přesnosti vyrobeného přípravku. Pokud bude přípravek vystaven teplotním výkyvům, je prioritou zvolit teplotně stabilní materiál, jehož teplotní roztažnost neovlivní funkci přípravku. Tato problematika se týká především objemných a velkých přípravků vyrobených s požadovanou tolerancí v řádu jednotek mikrometrů, kde i malý rozdíl teplot vede k významné změně rozměrů. V případě kontrolních přípravků to může mít za následek špatné vyhodnocení měřené součásti.

b) Technologické vlastnosti

Jednou z možností výroby těles přípravků může být také svařování. Při návrhu svařence musí být zvolen materiál, který je pro svařování vhodný a poskytuje dostatečnou svařitelnost. Za takové materiály lze považovat běžné konstrukční oceli, z nichž se vyrábějí hutní polotovary určené přímo pro svařované konstrukce. Většina těchto ocelí je přímo vhodná také k obrábění, které je nezbytné pro výrobu přesných součástí přípravků. Pro méně přesné dosedací plochy přípravku se čím dál častěji využívá technologie 3D tisku. Tištěné součásti z polymerů se montují do tělesa přípravku a v případě jejich opotřebení je možné snadno vyrobit nový kus.

c) Chemické vlastnosti

Mezi hlavní požadavky kladené na přípravek patří životnost. Za běžných okolností je každý přípravek vystaven vlivu okolního prostředí, což může způsobovat degradaci některých materiálů a snížení životnosti. V případě běžných konstrukčních ocelí se bavíme o korozi, před kterou musí být materiál chráněn. Stejně tak součásti ze slitin hliníku je vhodné chránit před oxidací. Pro tyto účely se využívá tvrdá anodizace [6]. Povrchové úprava chrání materiál také před otěrem, kterému je vystaven například při opakované zakládání a vyjímání součástí.

4 PŘEHLED METROLOGICKÝCH SYSTÉMŮ

4.1 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (SMS), označované také CMM (Coordinate Measuring Machine), od svého vývoje změnily způsob kontroly součástí ve všech odvětví průmyslu. Tyto stroje jsou určeny k měření geometrie fyzických objektů pomocí bodů extrahovaných ze součásti použitým snímacím systémem. Tyto systémy rozdělujeme dle principu snímání bodů na dotykové a bezdotykové - optické. Dále pak rozlišujeme snímací systémy na několik hlavní typů, například mechanické, optické, laserové a další. [13]

Primární rozdělení CMM se provádí na základě konstrukčního uspořádání stroje na stacionární a mobilní, nebo dle souřadnicového systému stroje na kartézské a nekartézské. [13]

4.1.1 Stacionární CMM

Stacionární souřadnicové měřicí stroje (viz obr. 4-1), neboli stroje s kartézským souřadnicovým systémem rozdělujeme dle konstrukce na:

a) Sloupový (stojanový) typ

Základ sloupového SMS tvoří pohyblivý nosný sloup, k němuž je upevněno vodorovné rameno se snímací hlavou na jeho konci. Vertikální pohyb zajišťuje posuv ramene po sloupu. Pohyb ve vodorovné rovině zajišťuje kombinace dvou posuvů - pohyb celého sloupu po základně stroje v jednom směru a vodorovné rameno ve směru druhém. Tento typ otevřené konstrukce nabízí možnost využití dvou současně pracujících strojů umístěných na protilehlých stranách měřicího prostoru. Takto pracující stroje dokáží pokrýt velkou pracovní plochu pro měření objemných součástí. Toto řešení lze aplikovat přímo do výrobních linek, což je využíváno např. v automobilovém průmyslu. [14]

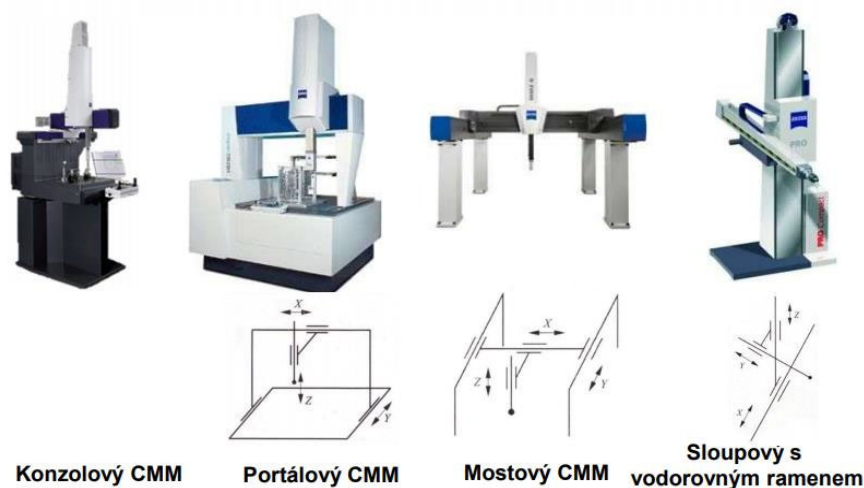
b) Výložníkový (konzolový) typ

Základem tohoto typu stroje je vyložené pohyblivé rameno umístěné na pevném rámu. Na tomto rameni se nachází připevněná pinola, jejíž posuv zajišťuje vertikální pohyb snímací hlavy na jejím konci. Pohyb ve vodorovné rovině je řízen posuvem pinoly po rameni a posuvem celé konzole po rámu stroje. Tento typ SMS nabízí přístup do pracovního prostoru ze tří stran a umožňuje tak snadné vkládání a vyjímání součástí.

Nevýhodou této konstrukce je však vyložení ramene. S rostoucí vzdáleností pinoly od rámu stroje dochází k nárůstu ohybového momentu vlivem hmotnosti pinoly, což má za následek omezení délky ramene. Měřicí rozsah stroje se obvykle pohybuje v blízkosti rozsahu 500 x 500 x 500 mm. To z něj dělá vhodného zástupce pro měření malých až středně velkých součástí, především v dílenském prostředí. Mezi typické zástupce výložníkové SMS patří TIGO SF, který je podrobněji popsán v kapitole 5. [14]

c) Portálový typ

Portálový SMS se vyrábí ve dvou variantách konstrukce. První varianta stroje zahrnuje pohyblivý portál s pevným stolem. U druhé varianty je naopak portál pevný a stůl pohyblivý. Tento typ konstrukce poskytuje zvýšenou tuhost a nabízí tak vyšší dosahovanou přesnost měření, kterou lze využít pro laboratorní měření. Tuhá konstrukce však omezuje přístupnost a měřicí rozsah stroje, což limituje velikost měřených součástí. [14]



Obr. 4-1 – Rozdělení stacionárních CMM [13]

d) Mostový typ

Mostový SMS se skládá z masivní základové konstrukce poskytující vysokou tuhost, která umožňuje výrobu obrovských strojů s měřicím rozsahem v řádech metrů. S ohledem na velký pracovní rozsah poskytují mírně nižší přesnost, ale poskytují vysokou rychlost. Díky svým rozměrům a otevřenému prostoru jsou využívány v automobilovém a leteckém průmyslu. Mezi zástupce mostových SMS patří DEA Alpha, jehož parametry jsou podrobněji uvedeny v kapitole 5. [14]

4.1.2 Mobilní CMM

Mobilní souřadnicové měřicí stroje (viz obr. 4-2), tedy stroje s nekartézským souřadnicovým systémem rozdělujeme na:

- a) Měřicí ramena
- b) Laser Tracker
- c) Laser Radar
- d) Laser Tracer



Obr. 4-2 – Rozdělení mobilních CMM [13]

5 METROLOGICKÉ SYSTÉMY FIRMY DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o.

5.1 DEA Alpha 2.0

Mostový SMS DEA Alpha 2.0 (obr. 5-1) patří mezi velmi výkonné stroje s velkým měřicím rozsahem a přesností. Základ mostové konstrukce tvoří 4 nosné sloupky, na nichž jsou pevně usazeny dva tzv. pilony, které poskytují vedení pro pojízdný most. Na příčniku tohoto mostu se pohybuje vozík, jehož součástí je pinola zajišťující svislý pohyb. Konstrukční provedení stroje využívá na všech osách vzduchová ložiska. Pohyb v osách zajišťují DC motory pomocí ozubeného řemene, který poskytuje tichý chod. Chyba měření a hodnoty měřicího rozsahu stroje v jednotlivých osách jsou uvedeny v tab. 5-1. [15]

Tab. 5-1 – Parametry stroje DEA Alpha 2.0 [15]

Měřicí rozsah [mm]		
X	Y	Z
2000	3300	1500
Max. chyba měření dle ISO 10360-2, -4 ; při teplotě T = 18-22 °C		
$E_{0,MPE} = 4,5 + 4,2L/1000$ (L v mm) [μm]		

SMS Alpha je opatřen indexovatelnou snímací hlavou poskytující natáčení ve 2 navzájem kolmých osách s krokem 5°. Vytočení jedné osy se může pohybovat v rozsahu +90° až -115°, rozsah druhé osy je ± 180°. Kombinace jednotlivých natočení nabízí až 3 024 jedinečných poloh. Snímací hlava je osazena skenovací sondou zajišťující bodové i kontinuální skenování pomocí nejrůznějších variant dotyků. Zmíněné množství poloh natočení tak poskytuje měřicímu dotyku přístup i k obtížně dostupným plochám v prostoru. [15]

Stroj je ve firmě Doosan Bobcat EMEA s.r.o. umístěn v klimatizované místnosti s pevně nastavenou teplotou 21 °C, která zaručuje rozměrovou stálost měřených součástí a stabilitu výsledků měření. V případě nutnosti je stroj opatřen i systémem pro kompenzaci vlivu teploty se 7 snímači, které zajišťují značnou přesnost i za zhoršených podmínek. [15]



Obr. 5-1 – Měřicí stroj DEA Alpha 2.0 [17]

Firma stroj využívá primárně k měření velmi rozměrných svařenců, jako jsou například rámy strojů, výložníky a ramena, u kterých se provádí pravidelná kontrola po procesu svařování. Využitelnost stroje je však široká, kromě svařenců je stroj vhodný a lze na něm provádět také rozměrovou kontrolu obrobků s vysokými požadavky na přesnost.

5.2 TIGO SF

Vysoce výkonný souřadnicový měřicí stroj TIGO SF, zobrazený na obr. 5-2, je určený pro práci přímo ve výrobě. Konstrukce stroje umožňuje jeho přemísťování pomocí vysokozdvizného vozíku včetně všeho potřebného vybavení. Přímou v podstavci má stroj zabudovaný počítač s ovladačem a na připevněném otočném rameni se nachází monitor a další periferie. Zároveň stroj nevyžaduje potřebu stlačeného vzduchu pro lineární vedení, což ještě více usnadňuje instalaci i přemístění stroje. [16]



Stroj nabízí vysokou přesnost (viz tab. 5-2) Obr. 5-2 – Měřicí stroj TIGO SF [16] a kompaktní rozměry, čímž se stává velmi vhodným řešením pro měření širokého spektra přesně vyrobených součástí. V měřicím prostoru o rozsahu 500 x 580 x 500 mm, který je otevřený ze tří stran, lze měřit součásti malých i středních rozměrů různého charakteru. [16]

V kategorii strojů pro dílenské prostředí se TIGO řadí mezi nejpreciznější stroje na trhu.

Tab. 5-2 – Parametry SMS TIGO SF [16]

Měřicí rozsah [mm]		
X	Y	Z
500	580	500
Max. chyba měření dle ISO 10360-2, -4 ; při teplotě T = 18-22 °C		
$E_{0,MPE} = 2,2 + L/300$ (L v mm) [μm]		

Stroj TIGO SF disponuje zlepšenou strukturální kompenzací, která umožňuje přesné měření v rozsahu teplot 15 až 30 °C. Kromě nerovnoměrné teploty může být stroj v dílenském prostředí vystaven různým rázům a vibracím. Pro ochranu stroje a stability měření je stroj opatřen systémem pasivního i aktivního tlumení vibrací. [16]

Součástí stolu je upínací deska se závitovými otvory. Tyto otvory slouží pro upínací prvky Swift-Fix, díky kterým lze zajistit stabilní pevnou polohu součásti během měření. Přípravek složený z těchto prvků lze zároveň využít pro realizaci opakovatelného měření dané součásti. Pokud je další kus ustaven v přípravku, tedy na stejnou polohu jako při předcházejícím měření, odpadá nutnost ručního vyrovnání součásti operátorem a dochází ke zkrácení vedlejších časů procesu.

5.3 Měřicí rameno Absolute Arm 8530

7-osé měřicí rameno Absolute Arm (obr. 5-3) je vybaveno nejnovějšími systémy pro vysokou efektivitu měření. Po zapnutí ramene je připraveno k okamžitému měření, čímž poskytuje vysokou efektivitu práce bez nadbytečných vedlejších časů. Konstrukce vyrobená z uhlíkových vláken zaručuje tepelnou stabilitu při měření a také pevnost. [17]

Součástí měřicího ramene je snímací dotyk a především laserový skener RS5. Tento snímatelný skener umožňuje vysokorychlostní 3D skenování povrchů nejrůznějších materiálů a povrchových úprav. Snímání bodů zprostředkovává laserový řádek široký 115 mm s horizontální orientací. O sběr dat se stará měřicí software Polyworks Inspector, v němž se zpracovávají naměřená



Obr. 5-3 – Měřicí rameno Absolute Arm s laser skenerem [24]

data. Systém upínání skeneru umožňuje snadnou odnímatelnost, přičemž jeho opětovná montáž k rameni nevyžaduje nutnost kalibrace díky přesnému a opakovatelnému systému upínání. Tato skutečnost značně usnadňuje případnou manipulaci během měření, při kterém skener není využíván. [18]

Kombinace velmi přesného ramene Absolute Arm a laserového skeneru RS5 poskytuje široké pásmo využitelnosti v nejrůznějších průmyslových aplikacích. Ve firmě Doosan Bobcat EMEA s.r.o. se rameno se skenerem používá především na měření tvarově složitých nebo rozměrných součástí. Jeho použití a flexibilita měření z něj dělá

každodenního pomocníka při kontrole rozměrové kvality součástí. V tab. 5-3 jsou uvedeny jeho parametry.

Tab. 5-3 – Parametry měřicího ramene Absolute Arm 8530 [19]

Měřicí rozsah: 3000 [mm]
Přesnost celého skenovacího systému (rameno+skener)
SSA = 66 [μm]

6 PRAKTICKÁ ČÁST

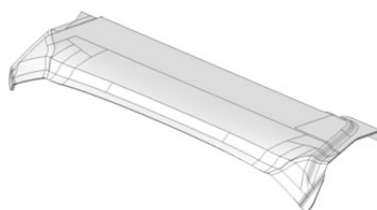
Sestava vnějších krytů rypadla je značně komplikovaná a skládá se z 8 hlavních vnějších krytů, které určují vizuální kvalitu rypadla. S rostoucím požadavky na přesnost výroby rostou i požadavky zákazníka na vizuální vzhled stroje.

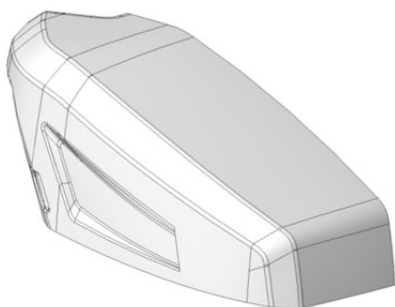
Nedokonalosti ve vzhledu stroje mohou být považovány za kritické požadavky na kvalitu stroje, a proto se musí vzhledové prvky pravidelně kontrolovat a případně optimalizovat. Po vzoru automobilek je vhodné pro tyto účely navrhnout přípravek určený k sesazení a měření všech vnějších krytů stroje. Takový přípravek je velmi přínosný k analyzování nepřesností vznikající ve fázi montáže. S použitím přípravku bude kontrola krytů probíhat efektivně, neboť lze měřit laserovým skenerem dohromady všechny upnuté kryty.

Jednotlivé kryty lze kontrolovat samostatně bez použití přípravku. Při tomto měření však nedochází k simulování upínací polohy ve stroji a na součást působí odlišný vliv vnějších sil. V případě ustavení součásti jiným způsobem než ve stroji dochází k rozdílné deformaci součásti vlivem gravitace. Zároveň kryt není vystaven silám od upínacích prvků na skutečném stroji. Měřicí přípravek simulující skutečný rám stroje odstraňuje tyto nedostatky a přináší optimální řešení pro měření podobných typů sestav. Po upnutí všech vnějších krytů lze navíc pozorovat jejich vzájemnou polohu a zkontrolovat tak tvar linií povrchů a mezery mezi jednotlivými kryty.

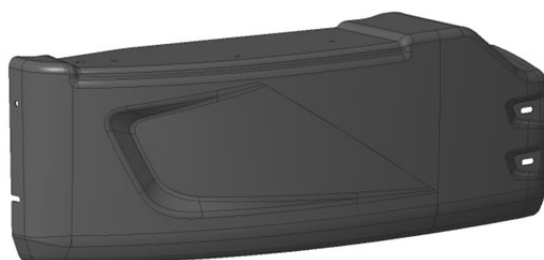
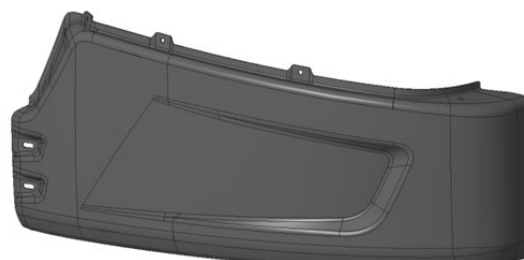
6.1 Vnější kryty rypadla

Vnější kapotáž rypadla tvoří celkem osm krytů (obr. 6-1 až obr. 6-8), které se připevňují na hlavní rám stroje. Tyto součásti nemají kromě zakrytování vnitřních částí stroje žádnou stěžejní funkci. Podílejí se však zásadně na celkovém vzhledu stroje, který se z hlediska marketingu považuje za jeden z hlavních předpokladů pro oslovení koncového zákazníka. I z těchto důvodů jsou na kryty kladeny vysoké nároky na celkový vzhled ve fázi návrhu a následně i při konečné montáži. Jednotlivé kryty musejí splňovat předepsané specifikace dle výkresu, především rozměrové, tvarové a vzhled povrchu. Zásadním faktorem je jejich vzájemné lícování po montáži, které může být v některých místech kritické z hlediska kvality stroje.


Obr. 6-1 – Kryt 1

Obr. 6-2 – Kryt 2

Obr. 6-3 – Kryt 3

Obr. 6-4 – Kryt 4

Obr. 6-5 – Kryt 5

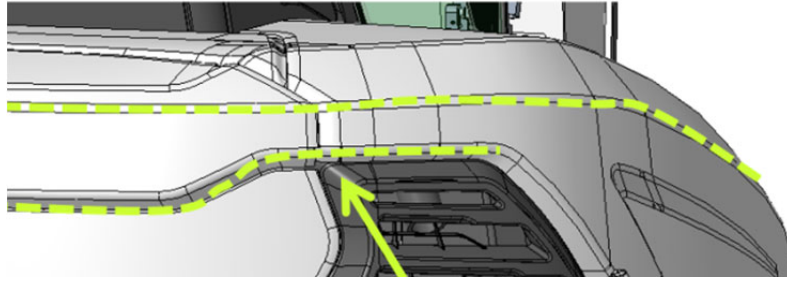
Obr. 6-6 – Kryt 6

Obr. 6-7 – Kryt 7

Obr. 6-8 – Kryt 8

Kryty 1 až 6 jsou vyrobeny z pevných tvrzených kompozitních materiálů, přičemž se u většiny jedná o kombinaci polyesteru se skelnými vlákny. Boční plechové kryty 7 a 8 jsou vyrobeny z ocelového plechu.

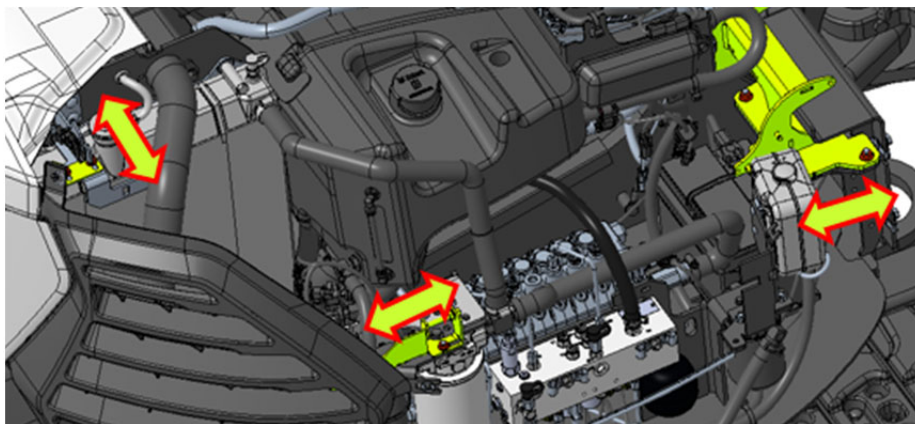
Další součásti podílející se na celkovém vzhledu stroje je protizávaží. Mimo hlavní funkci vyvažování stroje při práci, závaží plní také funkci vzhledovou. Svým tvarem kopíruje křivky vnějších krytů, slouží pro upínání součástí podepírající kryty a nepřímo tak určuje jejich pozici a vzájemnou vůli.

Problematikou vnějších krytů rypadla je především jejich montáž, při které je velmi obtížné dosáhnout pozic krytů vyhovující požadavkům na vnější vzhled stroje. Celá montážní sestava poskytuje krytům značnou pohyblivost vůči rámu stroje a úkolem operátora je najít optimální pozici nastavitelných součástí. Na obr. 6-9 jsou zobrazeny vybrané linie stroje, které operátor musí při montáži sledovat a dosáhnout polohy krytů v dané přesnosti. Aby správné nastavení polohy mohlo být realizováno, musí operátor

provést složité nastavení ustavujících dílů krytů, viz obr. 6-10. Tato velká variabilita poloh značně komplikuje montáž a dosahování vyhovující vizuální kvality stroje.



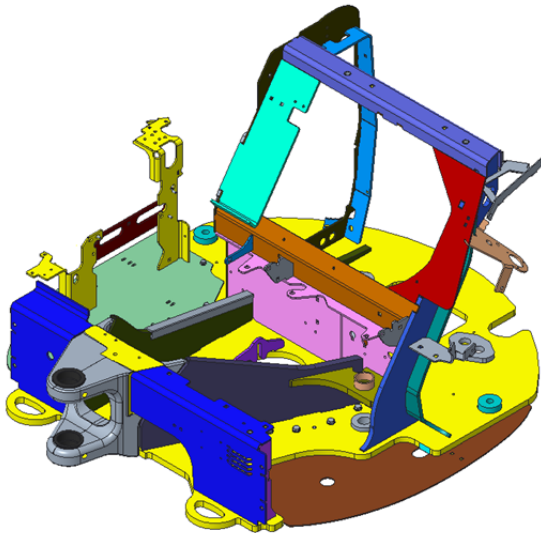
Obr. 6-9 – Požadavek montáže na vizuální kvalitu stroje [25]



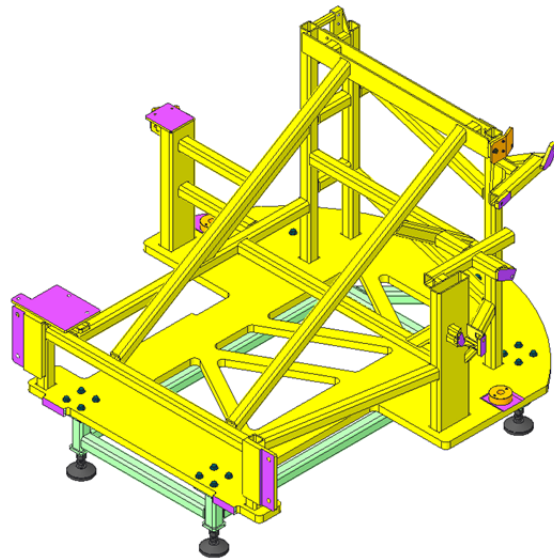
Obr. 6-10 – Složitost montáže krytů [25]

6.2 Představení původního přípravku

Základem rypadla E50z je svařovaná rámová konstrukce (obr. 6-11). Tato nosná konstrukce propojuje další hlavní části stroje, jako je podvozek, výložník nebo kabina. Jedná se tak o důležitý a kritický prvek pro funkčnost a montáž stroje, který se zároveň podílí i na jeho celkovém vzhledu. Rám rypadla disponuje velkým počtem dosedacích ploch a otvorů, které slouží přímo pro montáž vnější krytů a součástí s nimi spojenými.



Obr. 6-11 – Rám rýpadla



Obr. 6-12 – Původní podoba přípravku

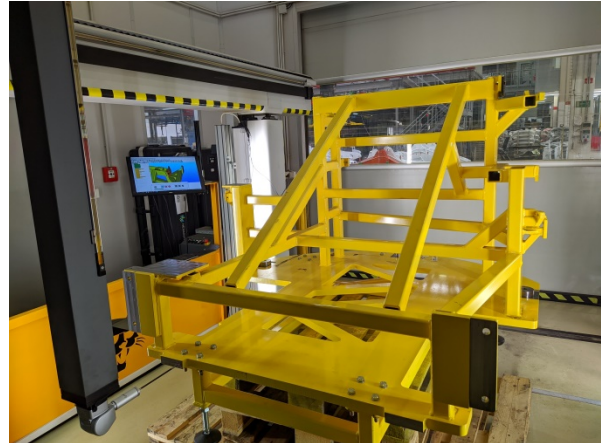
Aby mohla být ověřena rozměrová kvalita vnějších krytů stroje, nechala firma Doosan Bobcat EMEA s.r.o. zkonstruovat měřicí přípravek, na kterém je možné kryty kontrolovat bez vlivu nepřesností rámu. Tato podoba přípravku sloužící pro upínání a kontrolu vnějších krytů rypadla je zkonstruována jako přesněji vyrobená verze rámu rypadla. Přípravek má za úkol simulovat všechny upínací plochy a otvory pro šrouby, které jsou na skutečném rámu stroje využívány pro montáž vnějších krytů. Na tyto plochy se montují plechové díly sloužící jako nosné panty nebo poziční plechy krytů. Několik ploch pak slouží přímo pro montáž krytů nebo závaží.

Pro zkonstruování svařovaného rámu byly využity běžně dostupné ocelové hutní polotovary, jako jsou plechy různých tloušťek vypálené do požadovaného tvaru a obdélníkové či čtvercové trubky. Základ rámu tvoří především spodní plech o tloušťce 30 mm. Tento plech plní nosnou funkci konstrukce a určuje tuhost samotného přípravku. Krom toho jsou jeho součástí přesně obrobene plochy, které definují hlavní souřadný systém přípravku. Tyto plochy byly využity pro odměřování při jeho obrábění a zároveň slouží pro přesné vyrovnání přípravku při měření na CMM.

6.2.1 Rozměrová kontrola původního přípravku

Pro ověření rozměrové kvality původního přípravku bylo provedeno jeho změření na SMS DEA Alpha. Měření přípravku proběhlo již v minulosti, avšak pouze jeho obrobené verze bez přípevněných funkčních dílů. [20]

Měřicí program vytvořený v softwaru PC-DMIS zajišťuje postupné měření všech důležitých geometrických prvků, jako jsou vyrovnávací plochy a dosedací plochy včetně usazovacích otvorů ležících na těchto plochách. Vyrovnání dat bylo provedeno na základní plochy metodou 3-2-1. Pro toto vyrovnání byly vyhodnoceny jednotlivé geometrické prvky a následně vytvořen protokol, který je obsažen v příloze této práce.



Obr. 6-13 – Měření původního přípravku

6.3 Konstrukční návrh rozšiřujících částí přípravku

Přestože stávající přípravek (obr. 6-12) obecně plní svou funkci a lze ho využít ke kontrole smontovatelnosti vnějších krytů rypadla, jeho použití pro kontrolu jejich rozměrové kvality má již značná omezení. Většina krytů pro svou montáž vyžaduje předmontáž nosných plechových pantů a dalších opěrných dílů. Právě tyto součásti propojují kryty se samotnou konstrukcí přípravku, čímž do soustavy vnášejí značnou chybu v podobě jejich nepřesného ustavení způsobené vřelymi v otvorech pro šrouby a také chybu způsobenou jejich rozměrovou nepřesností výroby. Z těchto důvodů se poloha krytů, resp. dosedacích ploch pro kryty určené, pohybuje v jednotkách milimetrů od nominální polohy. Toto řešení tedy není způsobilé pro ověření rozměrové kvality krytů a ke kontrole jejich vzájemného lícování. Primární využitelnost přípravku v tomto stavu se spíše přibližuje simulaci procesu reálné montáže a analyzování variability polohy krytů.

Pro správnou funkci kontroly krytů musí přípravek projít konstrukční optimalizací, která odstraní potřebu montáže pomocných součástí, ke kterým se kryty montují. Tyto součásti je nutné nahradit součástmi s přesně obrobenými plochami, které rozšíří celý přípravek a poskytnou dosedací plochy pro upnutí všech krytů.

Na základě rozboru součástí, které mají jednotlivé části rozšíření přípravku simulovat, je patrné, že se jedná pouze o plechové díly. Tyto plechové díly jsou tvarové výpalky, následně ohýbané nebo svařené do sestav. Jejich tvarová a rozměrová přesnost je tedy značně ovlivněna těmito procesy, které vnášejí do finálního výrobku určitou nepřesnost. I přestože tato nepřesnost vyhovuje požadavkům dle specifikace na výkresu dílu, stále se značně podílí na nepřesnosti polohy usazení vnějších krytů stroje, a tím i na jeho celkovém vzhledu a kvalitě.

6.3.1 Konstrukční předpoklady a specifikace

Zásadní předpoklad návrhu připojovacích prvků k přípravku spočíval v zachování původního přípravku (obr. 6-12) v jeho finálním stavu, tedy bez zásahu do jeho konstrukce. Ta splňuje vysokou přesnost výroby vyrovnávacích i dosedacích ploch, včetně polohy otvorů sloužící k ustavení sériových dílů.

Před návrhem dalších částí přípravku byla provedena analýza získaných dat z měření původního přípravku [20]. Na základě nich proběhla diskuze mezi konstrukčním oddělením a oddělením kvality, ze které se dospělo k závěru navrhnout každou rozšiřující část přípravku stejně jako původní konstrukci, tedy jako přesný obrobek neposkytující možnost seřizování. Od těchto součástí se totiž očekává jejich vyšší přesnost výroby a tedy dostatečná přesnost pozice dosedacích ploch po montáži k tělesu přípravku, i bez možnosti rozsáhlého nastavení jejich polohy.

Všechny funkční plochy sloužící k usazení vnějších krytů musejí simulovat tvar a polohu plechových součástí využívajících se při montáži na skutečném stroji. Průměry otvorů pro šrouby sloužící k uchycení vnějších krytů k daným plochám musejí odpovídat hodnotě shodné s otvory na skutečných dílech, čímž budou zajištěny stejné podmínky pro upnutí krytů. Od těchto ploch a otvorů se očekává vysoká přesnost jejich polohy vůči nominální hodnotě na kompletní sestavě přípravku, čímž bude zajištěno usazení dílu ve správné funkční poloze. Celý návrh je navíc zkomplikovaný výrobou těchto dílů na přesný rozměr, bez možnosti následné kalibrace.

Konkrétní navržená specifikace a kontrola jejího dodržení na vyrobených dílech přípravku je popsána v následujících kapitolách.

6.3.2 Technologické a materiálové požadavky

Při návrhu přípravků s vysokým požadavkem na jeho přesnost a kvalitu hraje zásadní roli zvolená technologie výroby a také materiál, ze kterého bude přípravek vyroben. U všech navrhovaných částí přípravku se předpokládá s využitím procesu obrábění, který dokáže nejlépe zajistit předem stanovené požadavky na přesnost funkčních ploch. Celý návrh je komplikován tím, že součást musí být obrobena na přesný rozměr.

Při procesu obrábění jsou na obrobek kladeny vysoké požadavky na jeho tuhost, která je ovlivněna samotnou konstrukcí, tvarem a materiálem polotovaru. Tuhost obrobku během obrábění může být také podpořena vhodným upnutím. Z důvodu výroby u externího dodavatele nelze však tento faktor při návrhu součástí přípravku zohledňovat. V případě nízké tuhosti obrobku může během obrábění dojít například k deformacím nebo vibracím, které budou mít negativní vliv na výsledný tvar a přesnost obráběných povrchů. Zvýšení tuhosti obrobku lze docílit především přidáním materiálu. To má však za následek růst hmotnosti a také ceny, a proto se musí volit vhodný kompromis.

Aby bylo možné součást vyrobit, musí se zvolit vhodný polotovar a materiál, který lze snadno obrobit dle navržených požadavků. S ohledem na kusovou výrobu těchto dílů jsou pro jejich výrobu vhodné především dvě možnosti. Jednou z nich je plný blok materiálu, druhou pak svařenec z běžně dostupných hutních polotovarů. Svařované konstrukce lze navrhnout ve tvaru blízkém finální součásti, čímž lze zajistit menší objem materiálu s dostatečnou tuhostí. Volbou svařence se také minimalizuje strojní čas obrábění, neboť dojde k obrobení pouze požadovaných funkčních ploch, kde byl navržen přírůstek na obrábění, a zbylé části svařence se neobrábějí.

Další možností by mohlo být použití stavebnicových sad pro tvorbu přípravků. Z důvodu jejich nevyužití při výrobě původní konstrukce se však tato volba nejeví za současného stavu vhodná a komplikovala by celkový návrh řešení.

6.3.3 Postup návrhu přípravku

Dosedací plochy krytů

Mezi hlavní výchozí předpoklady pro návrh přípravku patří zvolení vhodného způsobu upínání krytů. Pro zjednodušení návrhu a přiblížení se reálnému upínání došlo k převzetí geometrie ze sériových dílů. Tato volba se jeví jako nejvhodnější, protože poskytuje možnost simulování montáže odpovídající montáži na skutečném stroji, a tím

také ověření smontovatelnosti celkové sestavy vnějších krytů. Celkový návrh přípravku tedy ze značné míry vychází ze sériových dílů.

Tvar a rozměry opěrných a dosedacích ploch byly z velké míry zachovány, stejně tak i způsob upínání krytů pomocí šroubových spojení. Šroubové spoje u přípravku nebylo možné jednoduše nahradit, neboť k ustavení a připevnění většiny krytů slouží pevné závitové tyče, resp. matice, které jsou jejich součástí. Průměry a pozice otvorů, resp. drážek, určené pro tato šroubová spojení byly převzaty ze sériových dílů. Přípravek tak poskytuje obdobnou vůli pro upnutí a možnost polohování krytů přibližně stejně, jako je tomu na skutečném stroji.

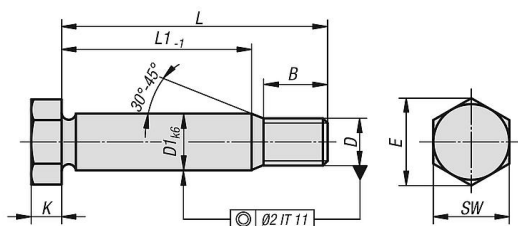
Pro tato spojení se na stroji využívá běžný spojovací materiál typu šestihranné matice a šrouby se šestihrannou hlavou. Ty však vyžadují montáž pomocí klíčů, jejichž použití v případě přípravků není příliš vhodné. Ačkoli by aplikace odlišného typu spojovacího materiálu, jako rychloupínací šrouby a matice, poskytovala snadnější a rychlejší ruční montáž krytů, z hlediska velmi omezeného manipulačního prostoru a přístupnosti došlo k zachování běžných spojovacích prvků. Při návrhu přípravku musel být brán zřetel na zajištění dostatečného manipulačního prostoru pro klíč v oblasti šroubových spojení.

Připojení částí přípravku k původní konstrukci

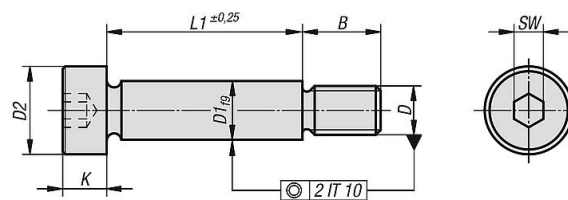
Problematickou oblastí návrhu bylo nalezení optimálního způsobu uchycení rozšiřujících částí přípravku k původní konstrukci. Ta kopíruje samotný rám stroje a je uzpůsobena pro upínání sériových dílů. Otvory pro šrouby tedy mají různé průměry, což komplikuje jejich použití pro případná přesná ustavení.

Dle analýzy naměřených dat získaných měřeními na SMS byl proveden rozbor těchto dosedacích ploch přípravku. Poloha většiny otvorů na těchto plochách byla vyhodnocena jako přesná. Z těchto důvodů se pracovalo s myšlenkou využít je pro přesné ustavení rozšiřujících částí, tedy ustavit je s minimální vůlí ve šroubových spojích sloužící pro smontování těchto částí k přípravku.

Pro tyto účely lze využít levnou variantu v podobě běžně dostupných normalizovaných lícovaných šroubů ve variantě se šestihrannou hlavou (norma DIN 609) nebo s hlavou s vnitřním šestihranem (norma ISO 7379). Šrouby DIN 609 (obr. 6-14) mají průměr dříku D1 s tolerancí k6, která je přímo vhodná pro přesná ustavení v kombinaci s otvory toleranční třídy H. Šrouby ISO 7379 (obr. 6-15) jsou vyrobeny s průměrem dříku D1 s tolerancí f9. Ta v kombinaci s otvory toleranční třídy H bude poskytovat určitou vůli.



Obr. 6-14 – Lícovaný šroub DIN 609 [21]



Obr. 6-15 – Lícovaný šroub ISO 7379 [22]

Pro jednotlivé otvory na přípravku se zvolil šroub s dřikem o průměru odpovídající průměru otvoru, případně se zvolil největší možný průměr pasující do daného otvoru. Na připojovacích plochách nových částí přípravků se navrhly průměry otvorů o velikosti odpovídající průměru dříku. Toto řešení zajišťuje co nejpřesnější usazení. V případě, kdy by z důvodu nečekaných výrobních nepřesností nebylo možné díly ustavit lícovanými šrouby, lze tyto šrouby vždy nahradit běžnými, které pokynou možností nastavení polohy v rámci vůle v otvoru.

Z hlediska tuhosti byla volba výchozího polotovaru a materiálu založena na doporučení zkušených kolegů a na nasbíraných datech z návrhu konstrukce původního přípravku. Inspirace byly brány především ze svařené konstrukce z hutních polotovarů. Při návrhu součástí byly využity primárně svařence z ocelových hutních polotovarů, jako jsou silnostěnné plechy a čtvercové trubky. Ty byly následně obrobena do finálního tvaru. Vybrané součásti složitějšího tvaru byly navrženy jako výrobky z plného bloku materiálu. Pro tyto účely se jako výchozí materiál zvolil blok ze slitiny hliníku.

Jako povrchová úprava ocelových částí bylo zvoleno černění, které poskytuje zvýšenou odolnost proti korozi. Součásti ze slitiny hliníku prošly procesem tvrdé anodizace, která ochraňuje povrch před oxidací a otěrem.

Postupný návrh konstrukčních řešení byl podpořen s využitím pevností analýzy v software Creo Simulate pro ověření dostatečné tuhosti součástí. Její ověření je pro správný návrh součástí stěžejní.

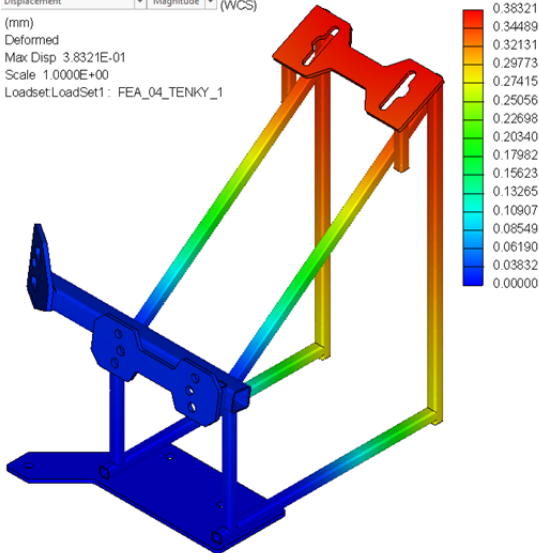
6.3.4 Pevnostní kontrola

Pevnostní kontrola založená na metodě konečných prvků v softwaru Creo Simulate vycházela z CAD modelů částí přípravku. Pro každou sestavu svařence bylo nutné poupravit stykové plochy jednotlivých komponent a vytvořit virtuální svary. Ty mají za úkol zajistit souvislé napojení ploch jednotlivých komponent svařence a zjednodušit tvorbu objemové sítě. Takto upravený CAD model se navíc přibližuje reálnému svařenci z hlediska pevnosti a objemu materiálu v místech svaru.

Samotná simulace se neobejde bez nastavení okrajových podmínek, kterým je součást reálně vystavena. Patří mezi ně především způsob jejího ukotvení a působící zatížení. Jako demonstrativní příklad je uveden postup optimalizace konstrukce pomocí pevnostní analýzy pro tvarově nejsložitější část přípravku – část č. 4 (obr. 6-26). Její virtuální ukotvení má za cíl co nejvíce simulovat skutečnost. Z těchto důvodů bylo zvoleno ukotvení spodní plochy a na otvory pro šrouby, které zamezují pohyb po této ploše. Reálný svařenec je v přípravku vystaven působící zátěži od hmotností upnutého krytu a také své od vlastní hmotnosti. Tyto vnější síly byly v simulaci nadefinovány jako síla od gravitačního zrychlení působící na celou součást a vnější síla odpovídající hmotnosti krytu č. 4 (obr. 6-4), tedy 12 kilogramů rovnoměrně rozložených na dosedacích plochách svařence. Deformace způsobené vlastní tíhou svařence zde nebylo možné zanedbat, neboť se značná část jeho objemu nachází v převislé poloze.

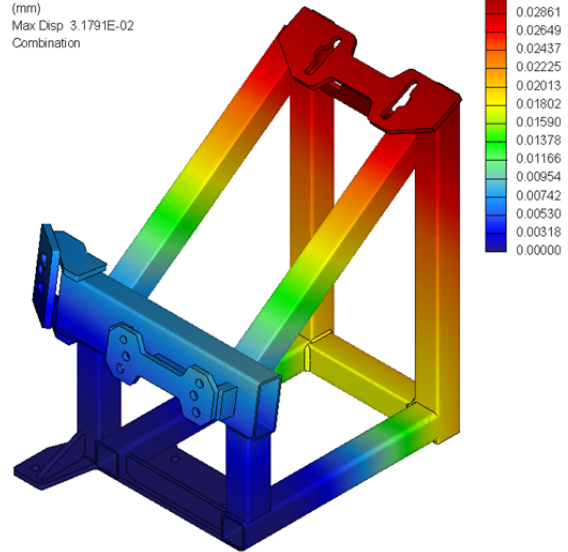
Tabulkovým materiálem využitým pro simulace byla nízkouhlíková ocel o hustotě $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a modulu pružnosti $E = 201 \text{ GPa}$. Jeden z prvních návrhů konstrukce využívá čtyřhranné trubky o rozměru 20 mm a tloušťce stěny 2 mm. Výsledné deformace způsobené zatížením dílu jsou zobrazeny na obr. 6-16. Maximální hodnota deformace 0,38 mm potvrzuje, že návrh je velmi nevhodný a vyžaduje vyztužení. V dalším návrhu již byly použity větší profily, konkrétně tyče o rozměru 40 mm a tloušťce stěny 3 mm. Výsledné deformace vyztužené konstrukce jsou zobrazeny na obr. 6-17. V tomto případě maximální deformace dosahuje pouze hodnoty 0,03 mm, což je 10x menší než v předchozím případě. Takovýto návrh lze považovat za správný, neboť v rámci přesnosti výroby této součást je takováto deformace zanedbatelná.

Displacement
 (mm)
 Deformed
 Max Disp 3.8321E-01
 Scale 1.0000E+00
 Loadset:LoadSet1 : FEA_04_TENKY_1



Obr. 6-16 – Deformace nevhodného návrhu

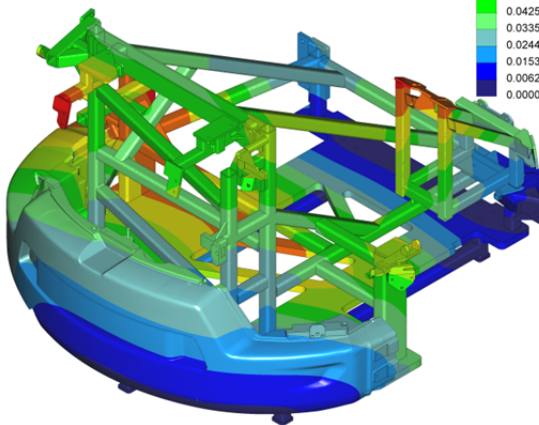
Displacement
 (mm)
 Max Disp 3.1791E-02
 Combination



Obr. 6-17 – Deformace vyztuženého návrhu

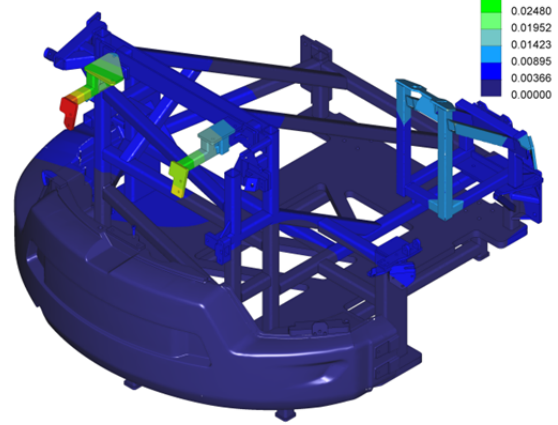
Pevnostní analýze byl podroben také finální přípravek. Jako vnější síly působící na jeho konstrukci byly definovány síly řízené hmotností krytů a opět vlastní hmotnost přípravku. Výsledky analýzy jsou zobrazeny na následujících obrázcích. Obr. 6-18 zobrazuje velikost deformací vlivem vlastní hmotnosti komponent. Obr. 6-19 pak vzniklou deformací od tíhy vnějších krytů. Součet těchto deformací vlivem kombinovaného zatížení je zobrazen na obr. 6-20.

Displacement Mag (WCS)
 (mm)
 Deformed
 Max Disp 9.4206E-02
 Scale 1.0000E+00
 Loadset:Gravity : FEA_2



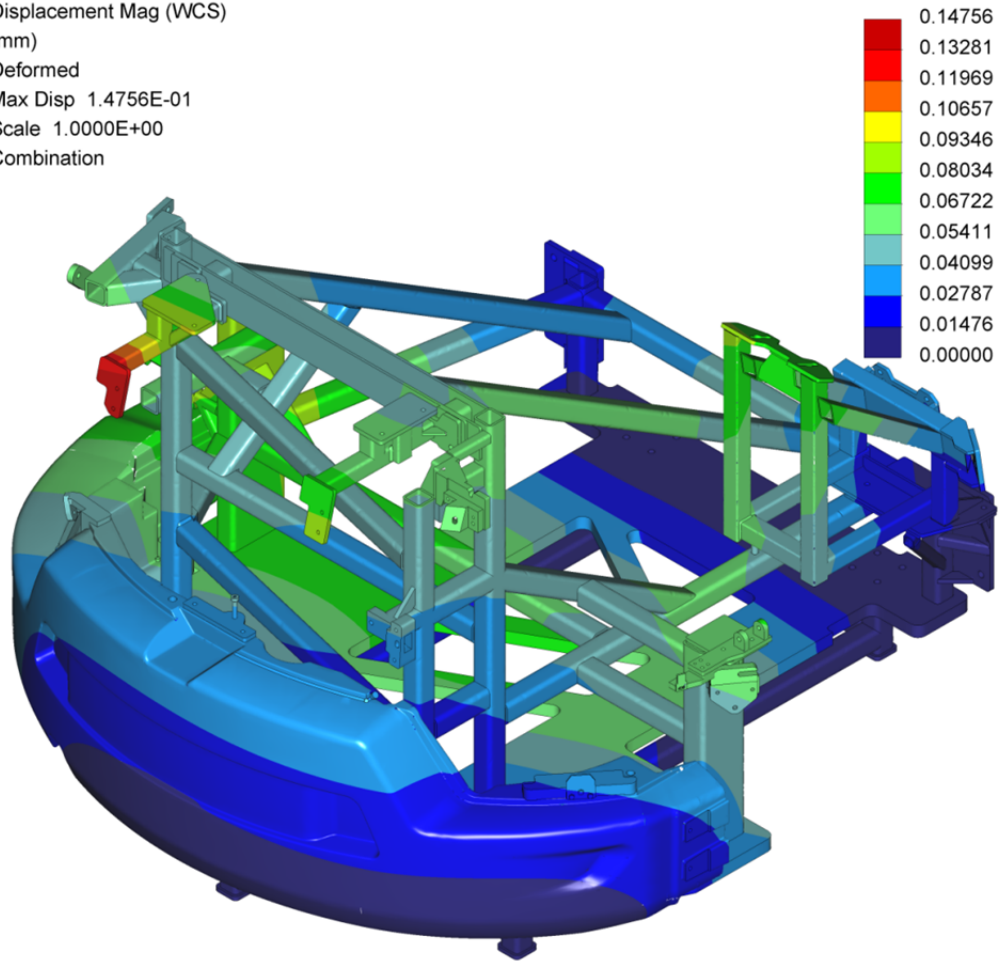
Obr. 6-18 – Deformace vlivem vlastní hmotnosti

Displacement Mag (WCS)
 (mm)
 Deformed
 Max Disp 5.4892E-02
 Scale 1.0000E+00
 Loadset:Covers_Only : FEA_2



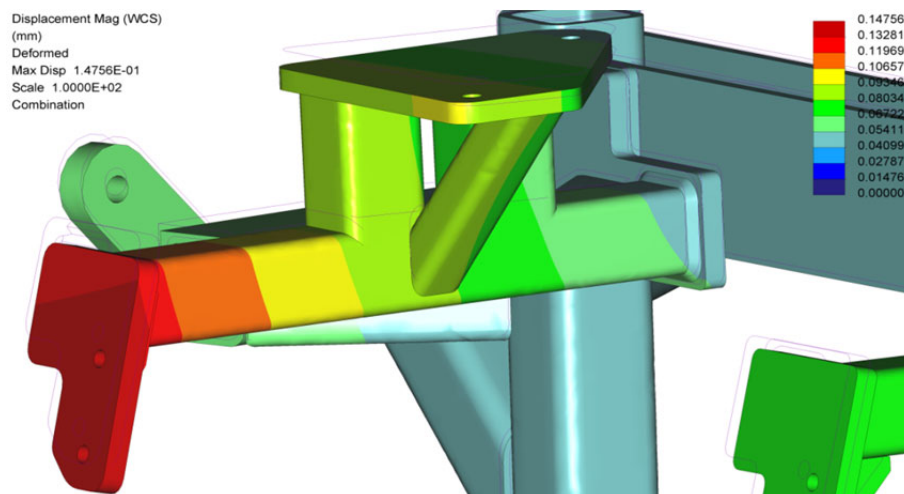
Obr. 6-19 – Deformace vlivem hmotností krytů

Displacement Mag (WCS)
 (mm)
 Deformed
 Max Disp 1.4756E-01
 Scale 1.0000E+00
 Combination



Obr. 6-20 – Celková deformace přípravku

Při tomto stavu zatížení se největší výsledné deformace projeví na vetknutých částech v horní části přípravku. Nejvíce deformovaná část přípravku je zobrazena na obr. 6-21.



Obr. 6-21 – Nejvíce deformovaná část přípravku

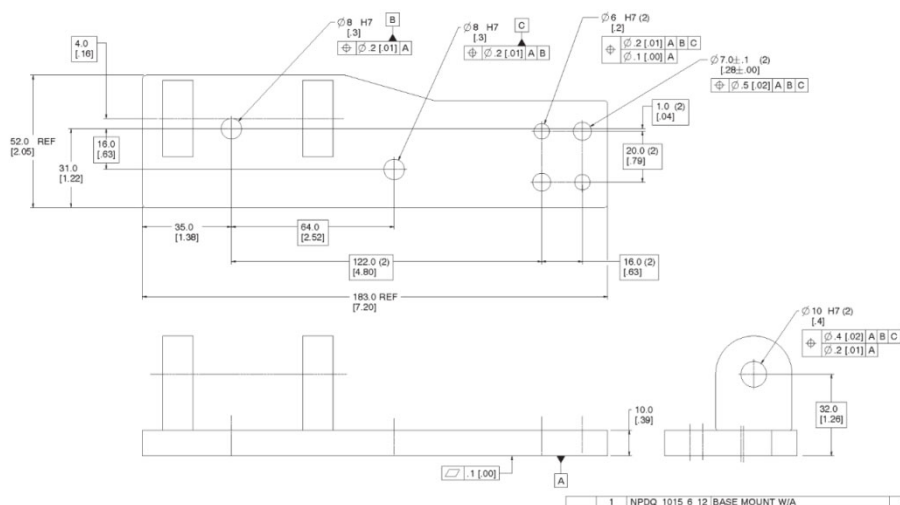
6.3.5 Výkresová dokumentace

Finální CAD modely součástí se využily pro tvorbu výkresové dokumentace, bez které nelze realizovat výrobu. Stejně jako 3D modelování, i tvorba výkresů jednotlivých výkresů probíhala v CAD softwaru Creo Parametric. Pro dosažení optimální přesnosti tvaru a rozměrů funkčních ploch bylo využito kótování GD&T, tedy kótování a tolerování s předepsáním základních ploch a geometrických tolerancí. Za základní plochy, ke kterým se vztahují další přesné prvky, byly zvoleny plochy sloužící k montáži na původní konstrukci přípravku. Nejčastěji se jedná o kombinaci základen A, B, C, přičemž základna A odpovídá dosedací rovině, základna B vyjadřuje středový bod otvoru ležícího na této rovině a základna C druhý středový bod otvoru na této rovině. Vyrovnání na tyto tři prvky plně určuje orientaci součásti v prostoru a všechny další prvky lze kótovat vůči základnám. Aplikace geometrických tolerancí, viz tab. 6-1 zajistí nejvyšší možnou přesnost zohledňující funkčnost součásti.

Tab. 6-1 – Vybrané geometrické tolerance aplikované na výkresech

Rovinná plocha	Rovinnost: T = 0,1 Tvar profilu: T = 0,3 vzhledem k základnám
Válcová plocha, otvor	Poloha: T = 0,2 vzhledem ke kolmé rovině Poloha: T = 0,3 vzhledem k základnám
Hodnoty tolerance T jsou uvedeny v mm	

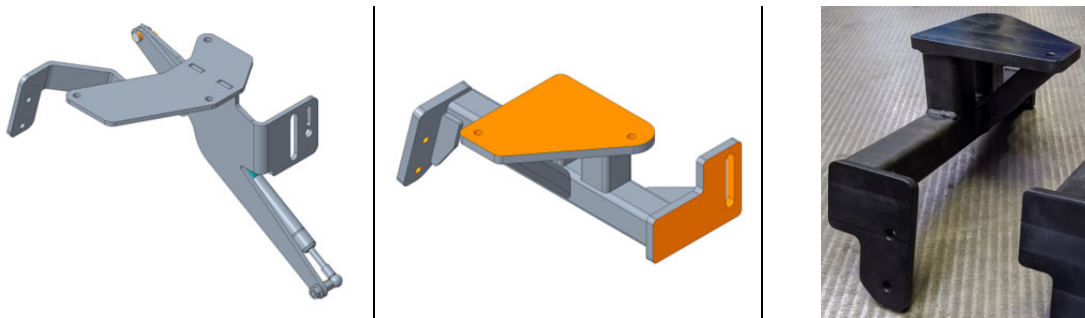
Na obr. 6-22 je zobrazen výkres jedné z navržených součástí. Veškeré výrobní výkresy jsou obsaženy v příloze B.



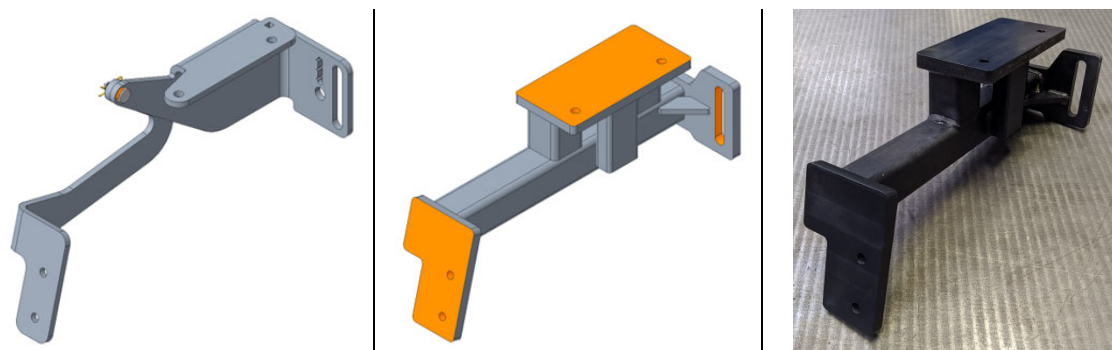
Obr. 6-22 – Výrobní výkres jedná z navržených součástí

6.4 Finální návrh částí přípravku

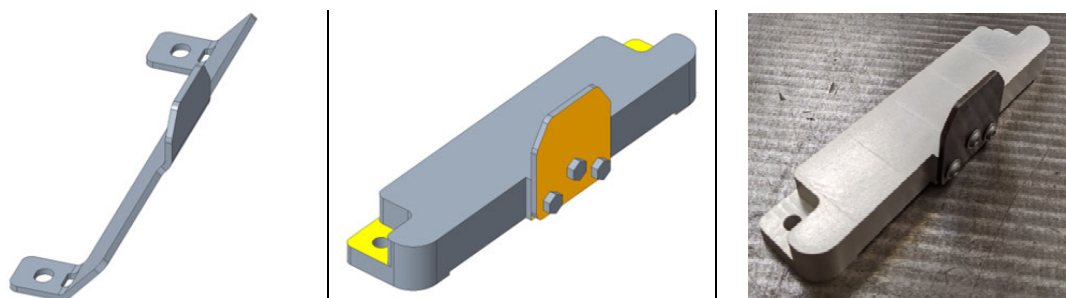
Následující souhrn znázorňuje všech osm finálních rozšíření přípravku. Pro každou část přípravku je zobrazena trojice obrázků, viz obr. 6-23 až obr. 6-30. Ty znázorňující sériovou součást (vlevo), ze které návrh vychází, finální 3D model rozšíření přípravku (uprostřed) a jeho vyrobenou podobu (vpravo). Před samotnou montáží přípravku bylo nutné provést rozměrovou kontrolu všech vyrobených součástí a ověřit tak jejich předepsanou přesnost na základě výrobního dokumentace uvedené v příloze B této práce.



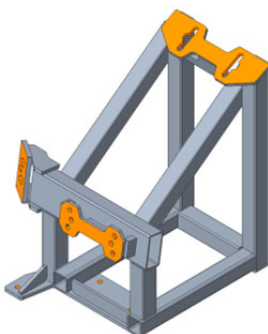
Obr. 6-23 – Část přípravku č. 1



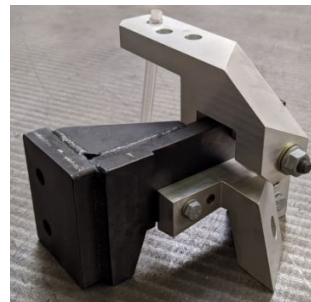
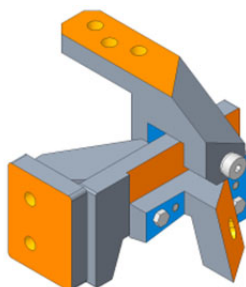
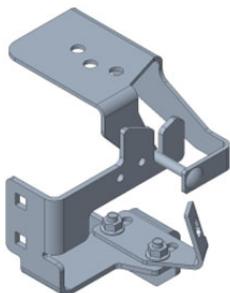
Obr. 6-24 – Část přípravku č. 2



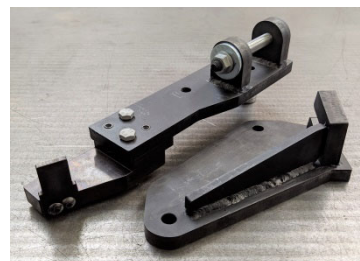
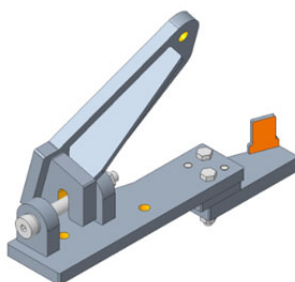
Obr. 6-25 – Část přípravku č. 3



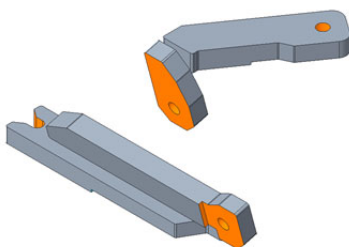
Obr. 6-26 – Část přípravku č. 4



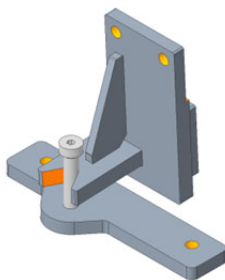
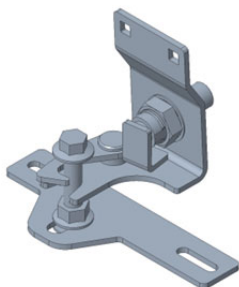
Obr. 6-27 – Část přípravku č. 5



Obr. 6-28 – Část přípravku č. 6



Obr. 6-29 – Část přípravku č. 7



Obr. 6-30 – Část přípravku č. 8

6.4.1 Rozměrová kontrola částí přípravku

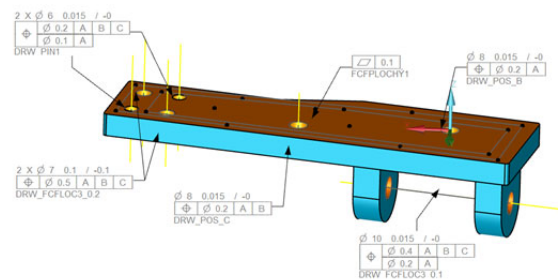
Jednotlivé vyrobené komponenty přípravku bylo zapotřebí proměřit pro ověření jejich rozměrové přesnosti, a to dle předepsaných specifikací ve výrobním výkresu. Pro tuto kontrolu byly využity stacionární CMM, konkrétně DEA Alpha a TIGO SF viz kap. 5.

Na stroji DEA Alpha byla měřena pouze jedna komponenta – část přípravku č. 4 (obr. 6-26), a to z důvodů její velikosti a složitosti tvaru. Měření všech ostatních komponent bylo realizováno na stroji TIGO SF, neboť jeho použití bylo pro tyto méně rozměrné části vhodnější.

Pro zajištění stabilního a nehybného upnutí měřených součástí byla na SMS TIGO SF využita stavebnicová sada Swift-Fix, viz obr. 6-31. Pestrá nabídka opěrných a upínacích prvků poskytla jednoduché složení přípravku pro stabilní usazení součásti na stole.



Obr. 6-31 – Měření součásti na TIGO SF s využitím sady Swift-Fix



Obr. 6-32 – Grafické znázornění měřené součásti v PC-DMIS

Každý měřicí program tvořený v softwaru PC-DMIS zahrnoval 3D model měřené součásti, viz obr. 6-32, k jejíž nominální geometrii se porovnávají naměřené body a prvky. Jako první krok při tvorbě měřicího programu se provádí tzv. manuální vyrovnání. To spočívá v ručním změření určitého počtu geometrických prvků na součásti, s jejichž pomocí se určí poloha součásti v souřadném systému stroje. Toho je docíleno provázáním měřených dat s CAD modelem součásti. Po vyrovnání se nadefinuje postup měření jednotlivých geometrických prvků, které mají být vyhodnoceny, přejezdové dráhy a případné výměny měřicích dotyků. Pro zajištění bezchybnosti programu lze celý proces měření v PC-DMIS simulovat. Při spuštění měřicího programu se SMS přepne do CNC režimu a provede úkony naprogramované operátorem. Získaná data z měření se následně zpracovávají dle specifikace uvedené na výkrese.

Všechny součásti přípravku využívají systém ISO kótování a tolerování, tudíž mají předepsány základní plochy, ke kterým se vyhodnocují další geometrické prvky. Na tyto

základny se každá součást nejprve vyrovná a až poté se vyhodnocují tolerance elementů jako je rovinnost, tvar, poloha, rozměry a další.

Až na několik výjimek, všechny měřené komponenty byly vyrobeny ve vyhovující přesnosti dle výrobní dokumentace. Je však nutné počítat s tím, že všechny tyto nepřesnosti se negativně projeví při kalibraci přípravku. Protokoly z měření pro jednotlivé součásti jsou obsaženy v příloze C.

6.5 Sestava kompletního přípravku

Po následné výrobě všech komponent a jejich rozměrové kontrole se již mohlo přistoupit k montáži a seřízení celého měřicího přípravku.

6.5.1 Postup montáže

S ohledem na skutečnost, že obrobené dosedací plochy původní ocelové konstrukce přípravku nechrání žádná povrchová úprava, bylo před montáží dalších částí provedeno nakonzervování povrchů olejem pro zachování jejich kvality.

Několik navržených součástí přípravku neslouží k připevnění na hlavní přípravek, ale až na samotný kryt, čímž plní funkci polohování krytu vůči přípravku. Konkrétně se jedná o součásti přípravků č. 5, 6 a 8 – jejich horní části. Montáž těchto dílů se provádí až před procesem osazování krytů na přípravek, viz kap. 6.6.

Jako první se na konstrukci přípravku připevnilo protizávaží za pomoci jeřábu. Toto jednotunové závaží se usadilo na tři dosedací plochy přípravku a následně připevnilo pomocí šroubových spojů.

Vnitřní závitové otvory nacházející se na bočních stranách tohoto protizávaží se řadí mezi důležité prvky sestavy, a proto muselo dojít k vyhodnocení jejich polohy. Běžné měřicí dotyky, kterými firma Doosan Bobcat EMEA s.r.o. disponuje, nelze použít k měření těchto závitových otvorů M10. K jejich změření byly využity lícované šrouby M10 DIN 609 zašroubované v těchto otvorech (obr. 6-33). Jejich dřík přesných rozměrů a tvaru slouží k přenesení osy vnitřního závitu na osu válcového dříku šroubu, který lze změřit běžným dotykem.



Obr. 6-33 – Měření vnitřních závitů

Pomocí předem zvolených šroubových spojů byly ustaveny všechny rozšiřující části přípravku na původní rám. Po dokončení montáže byla celá sestava přípravku (obr. 6-34) podrobena měření na SMS.



Obr. 6-34 – Kompletní měřicí přípravek

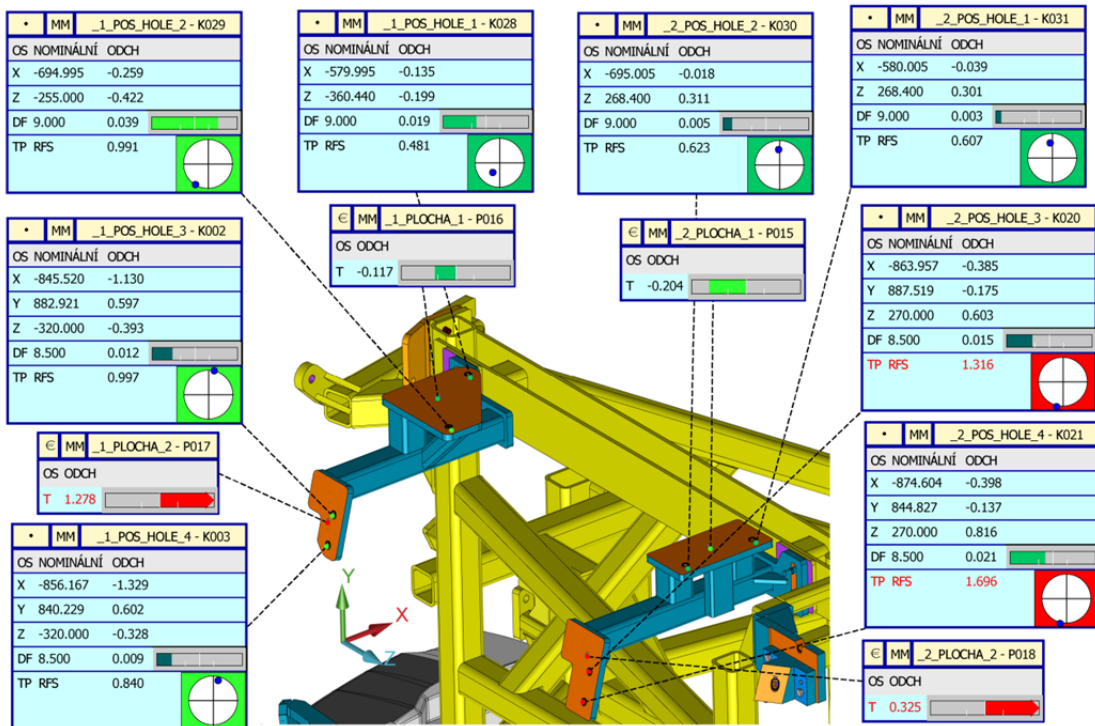
6.5.2 Rozměrová kontrola a kalibrace přípravku

Na základě výsledků dosahované přesnosti předcházejících měření původního přípravku a nově navržených komponent se jako cíl přesnosti nastavení přípravku zvolily hraniční tolerance dle tab. 6-2. Tyto tolerance lze obecně považovat za hodnoty o řád přesnější, než je poloha těchto ploch při montáži skutečného stroje.

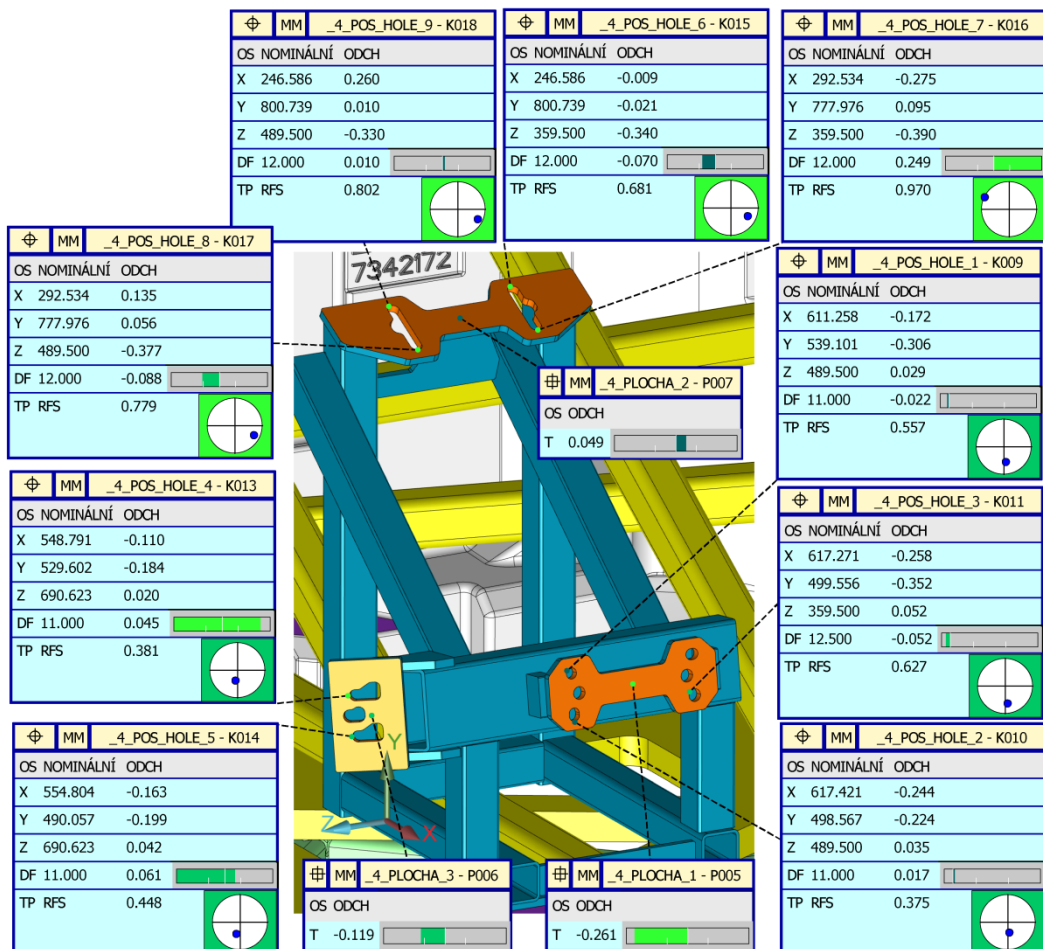
Tab. 6-2 – Zvolené mezní tolerance přípravku

Rovinná plocha	Nejvzdálenější bod: Tolerance $\pm 0,3$ mm od nominální roviny
Válcová plocha, vnější/vnitřní	Poloha středového bodu / osy: Tolerance pozice 1,0 mm

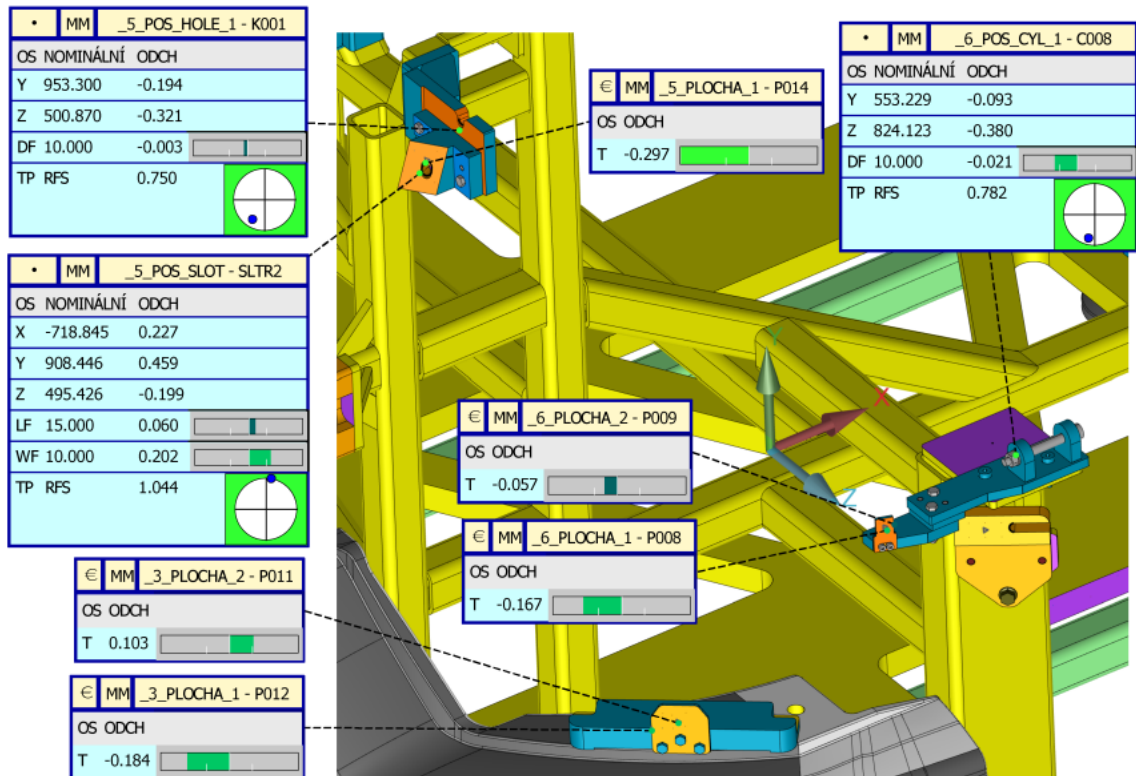
Kompletně sestavený přípravek byl podroben měření na SMS DEA Alpha s využití software PC-DMIS. Měřicí program obsahoval postup měření všech funkčních geometrických prvků, jakými jsou základní rovinné plochy původního přípravku sloužící k vyrovnání, dosedací plochy nově přimontovaných částí a válcové otvory pro šrouby ležící na těchto plochách. Prvotní měření mělo za cíl vyrovnat přípravek a zjistit v jaké výchozí poloze se nachází jednotlivé přimontované části přípravku. Výsledky potvrdily, že volba přesného uložení pomocí lícovaných šroubů se u některých částí vyplatila, neboť součást již byla umístěna ve stanovené toleranci.



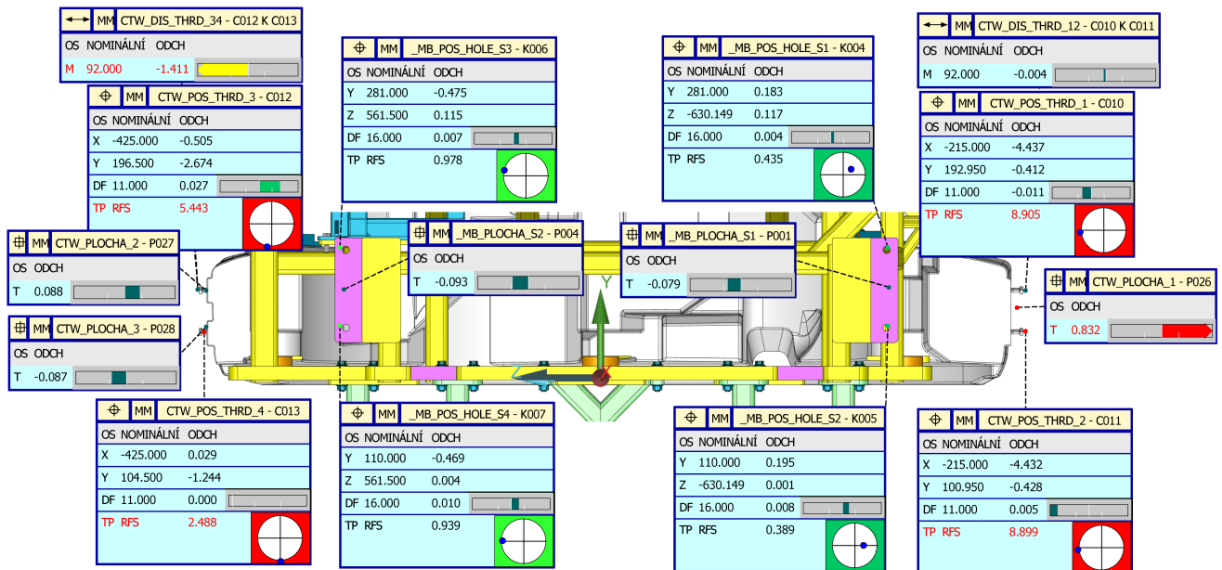
Obr. 6-35 – Rozměrová kontrola přípravku 1/6



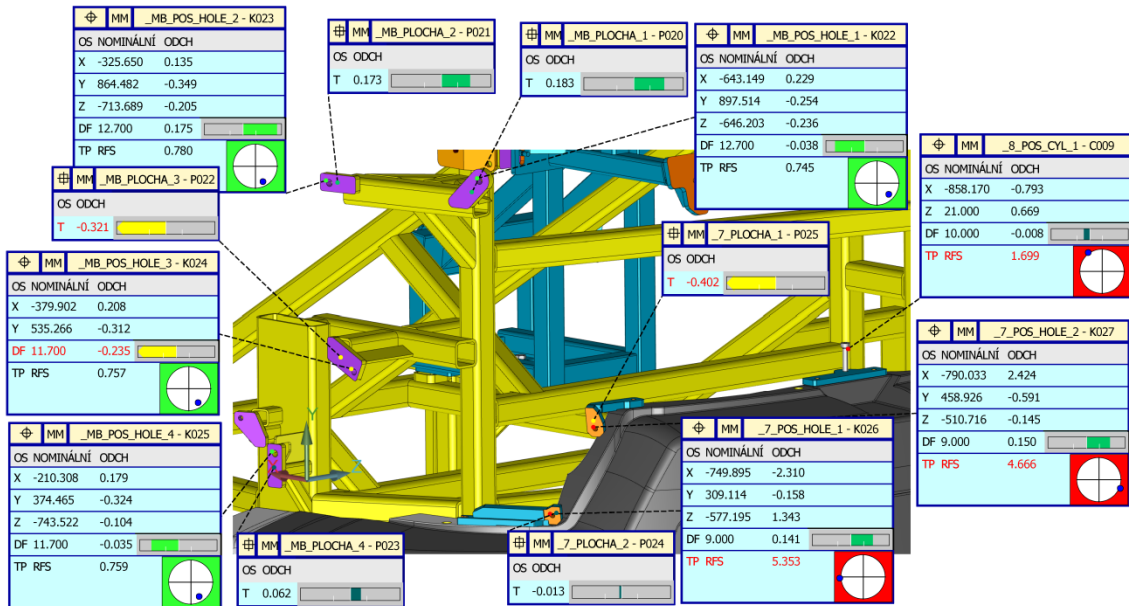
Obr. 6-36 – Rozměrová kontrola přípravku 2/6



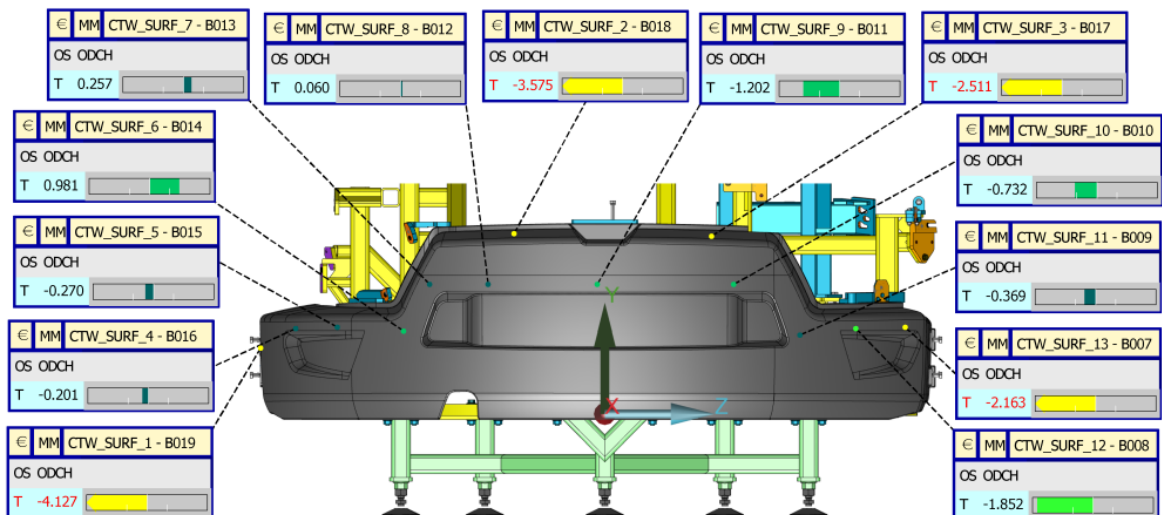
Obr. 6-37 – Rozměrová kontrola přípravku 3/6



Obr. 6-38 – Rozměrová kontrola přípravku 4/6



Obr. 6-39 – Rozměrová kontrola přípravku 5/6



Obr. 6-40 – Rozměrová kontrola přípravku 6/6

Po analyzování hodnot přišla na řadu kalibrace jednotlivých přimontovaných součástí, jejichž poloha vyžadovala úpravu. K nalezení polohy vyhovující předem zvolené toleranci pomohlo najíždění měřícím dotykem do nominálních souřadnic. Tato metoda umožnila kontrolu polohy nastavovaných ploch přímo při jejich montáži, neboť dotyk posloužil jako referenční bod, k němuž bylo možné součást opatrně dorazit. Při každé změně polohy jednotlivých částí došlo k jejich opětovnému přeměření. To probíhalo až do stavu, kdy daný prvek splňoval pozice vyhovující toleranci, resp. do stavu, kdy již nebylo možné dosáhnout přesnější polohy a plocha tak zůstala mimo toleranci. Výsledky přesnosti zkalibrovaného přípravku jsou zobrazeny na obr. 6-35 až obr. 6-40.

Zde se potvrdila nevhodnost návrhu pevných částí, jejichž jedinou možností nastavení poskytuje vůle v oblasti šroubových spojení. U části přípravku č. 1 a č. 2 se negativně projevil přebytek materiálu, jak na základní konstrukci, tak na samotných částech. To mělo za vliv přesazení opěrné plochy mimo předepsanou toleranci. Takovou součást není možné bez opravy seřídít. Mimo rozsah tolerance jsou také plochy ustavené na protizávaží. Tvar i poloha závaží značně ovlivnila polohu těchto ustavovacích prvků a pro jejich seřízení je nutná úprava nebo použití podložek a spojovacího materiálu, který poskytuje vyšší vůli v otvoru (šroub s tenkým dříkem).

6.6 Ověření funkčnosti přípravku

Po celkovém sestavení přípravku je zapotřebí ověřit, zda splňuje účel, ke kterému byl vyroben. Ověření funkčnosti daného přípravku se bude vyhodnocovat na základě smontovatelnosti krytů, realizovatelnosti procesu měření a opakovatelnosti polohy upnutých krytů.

6.6.1 Montáž krytů

Osazení krytů nejprve vyžaduje předmontáž zbývajících součástí přípravků na některé kryty rypadla. Horní část přípravku č. 8 se montuje na kryt č. 1 (obr. 6-41). Další volné části z přípravků č. 5 a č. 6 se připevňují na kryt č. 4 (obr. 6-42). Tyto díly mají za úkol zajistit vhodné umístění krytu a zamezení jeho pohybu v požadovaných směrech. Přesné umístění a opěrnou funkci zajišťuje kombinace ploch válec – zaoblená drážka.



Obr. 6-41 – Předmontáž krytu č. 1



Obr. 6-42 – Předmontáž krytu č. 4

Další kryty jsou montovány na základě pořadí dle tab. 6-3. Jejich montáž proběhla bez komplikací, čímž byla ověřena smontovatelnost sestavy na daném přípravku.

Tab. 6-3 – Postup montáže krytů na přípravku

Pořadí	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Kryt č.	2	3	5	6	7	8	4	1

6.6.2 Postup měření krytů

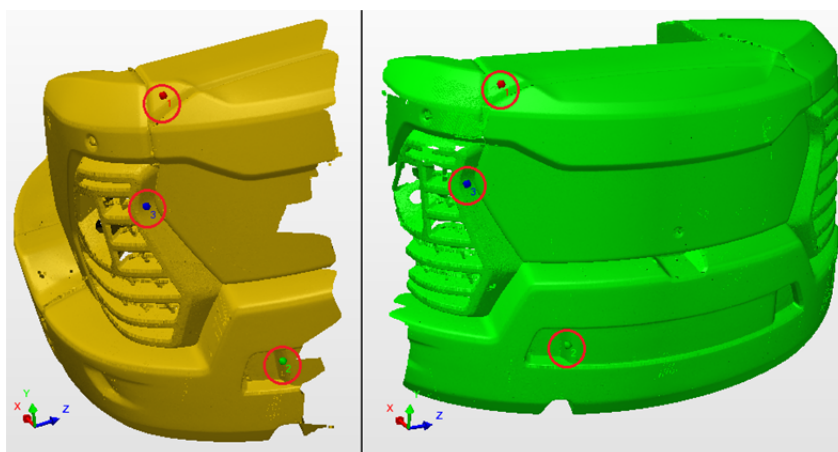
Pro měření osazeného přípravku bylo použito mobilní měřicí rameno ROMER Absolute Arm opatřené laserovým skenerem (viz kap. 5.3), které pro sběr dat a vyhodnocení využívá metrologický software PolyWorks Inspector. Proces měření zobrazuje obr. 6-43. Z důvodu rozměrnosti celkové sestavy nelze provádět měření ramenem pouze z jedné polohy. Způsob skenování tedy vyžaduje jeho rozdělení na více částí. S ohledem na měřicí rozsah se určily čtyři polohy kolem přípravku, ze kterých se postupně provádělo skenování pomocí ramene. Z těchto míst bylo možné provést měření celé sestavy, avšak s negativním vlivem vnesení čtyřnásobné chyby měřidla. S ohledem na značně vyšší tolerance měřených krytů však lze tuto nepřesnost zanedbat.



Obr. 6-43 – Skenování krytů pomocí měřicího ramene

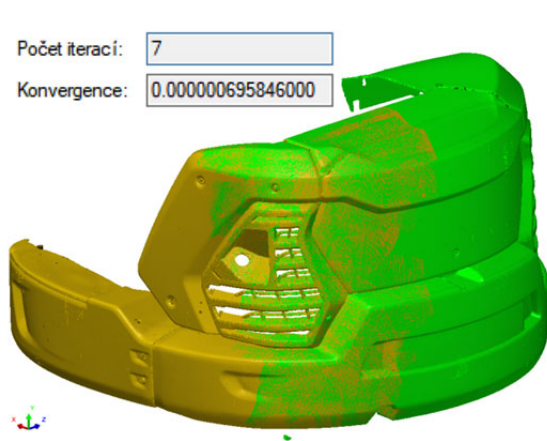
Volba těchto měřicích poloh pro měření je vždy podmíněná dostatečně velkým překrytím sousedních mračen bodů. Data získaná z jednotlivých umístění ramene mají vždy jiný souřadnicový systém, který se musí sjednotit. Pro vzájemné proložení dvou sousedních mračen bodů, a následně všech čtyř dohromady, se při skenování musí dodržet překrytí jednotlivých mraků bodů. Bez dostatečného překrytí by nebylo možné jednotlivá naskenovaná data proložit do sebe s vysokou přesností, což by vedlo k chybnému měření.

Proces proložení dvou mračen bodů využívá matematické proložení dat pomocí iterační metody, s jejíž pomocí se k sobě nasnímaná mračna postupně přibližují a prokládají do sebe. Prokládání může probíhat plně automaticky. Aby však počet iterací dosahoval malého počtu a šetřil se tak výpočetní čas, software PolyWorks Inspector poskytuje funkci ručního před-vyrovnání. To funguje na principu označení několika bodů, jejichž poloha odpovídá přibližné stejnému umístění na obou mračnech. Pro takové před-vyrovnání byly zvoleny vždy tři body. Princip této metody je zobrazen na obr. 6-43, kde jsou vybrány tři páry bodů.

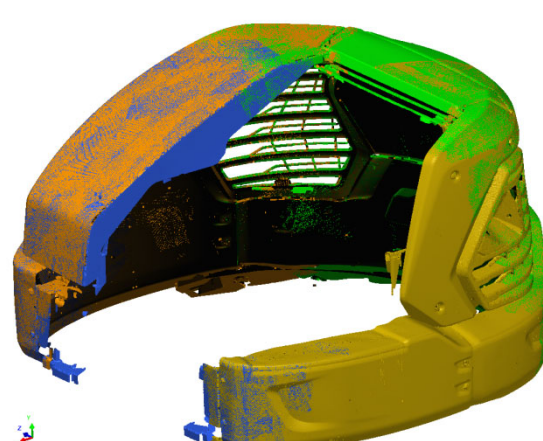


Obr. 6-44 – Ruční před-vyrovnání dvou mraček bodů

Po výběru těchto bodů již pokračuje proces proložení dat automaticky až do doby, kdy je dosažena požadovaná přesnost daného proložení vyjádřená konvergencí (obr. 6-44). Ta musí být velmi malá, aby se chyba proložení mohla zanedbat.



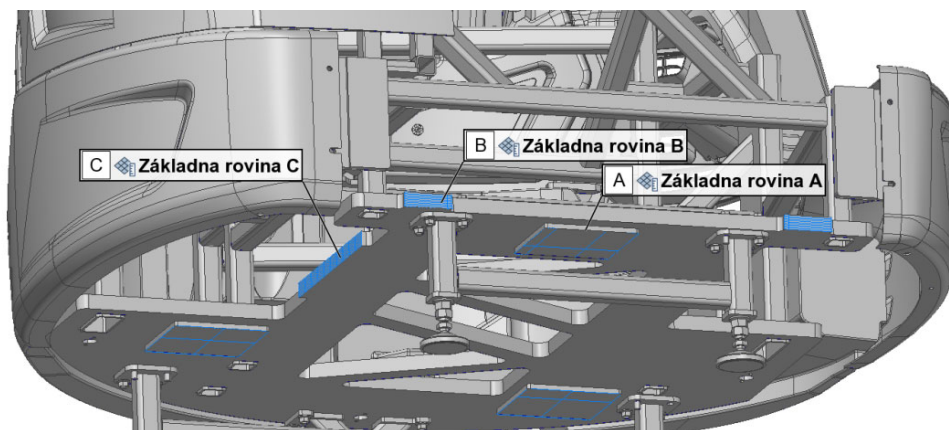
Obr. 6-45 – Výsledné zarovnání dvou mraček bodů



Obr. 6-46 – Kompletní naskenované body

Po proložení všech čtyřech mraků bodů (obr. 6-46) bylo provedeno dotykové měření vyrovnávacích ploch A, B, C zobrazených na obr. 6-47. Na tyto plochy se naměřená data vyrovnala a následně se mračna bodů převedla na STL síť.

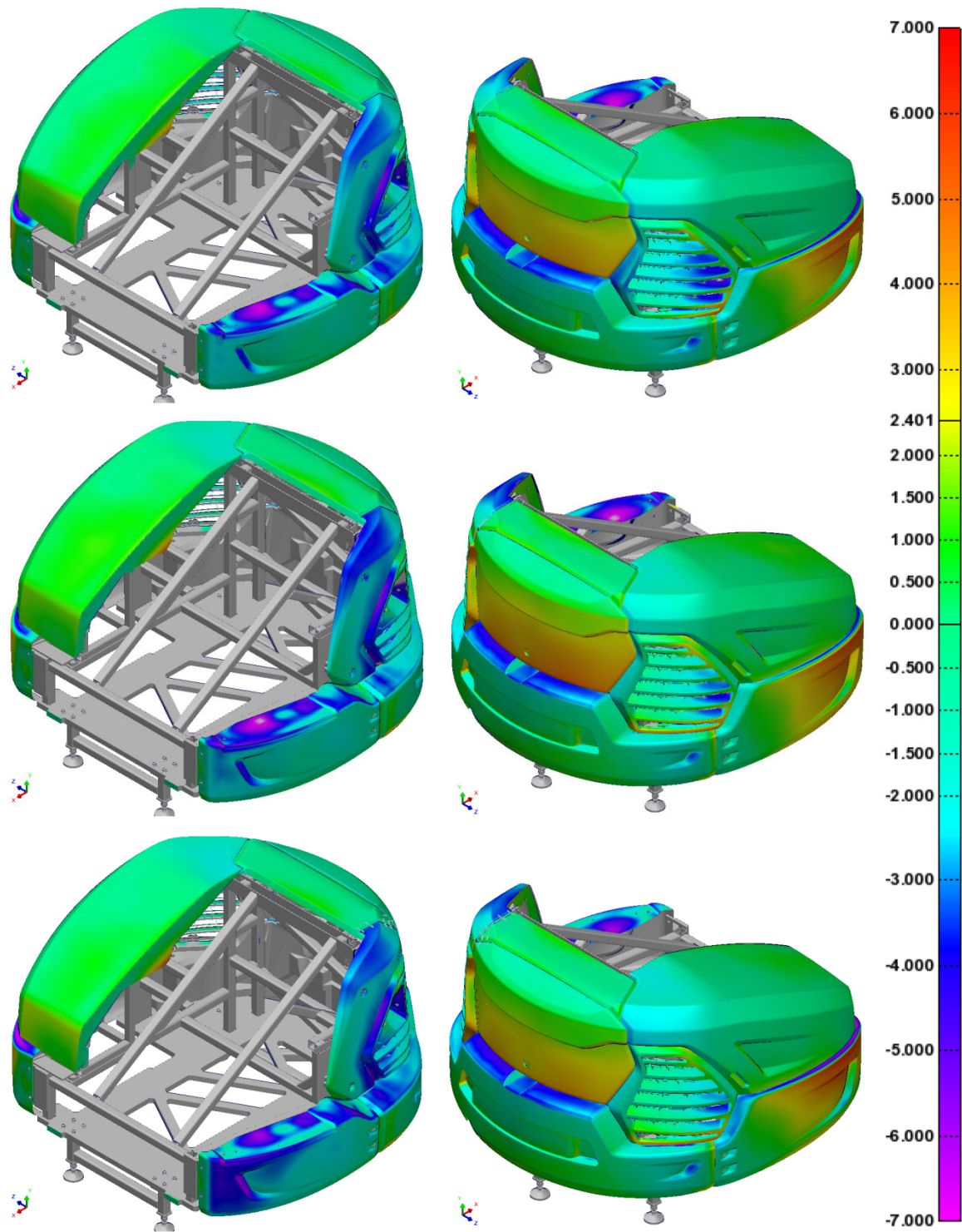
Celý proces kontroly zahrnoval 3 měření celé sestavy za použití shodných krytů. Před každým dalším měřením došlo k demontáži a opětovné montáži krytů rypadla a celý proces byl realizován jedním operátorem. Nasbíraná data z jednotlivých měření lze mezi sebou porovnávat a zhodnotit opakovatelnost upnutí součástí na přípravku a také kvalitu jednotlivých krytů.



Obr. 6-47 – Referenční plochy pro vyrovnání přípravku

6.6.3 Výsledky měření

Pro získání informací o poloze a rozměrové přesnosti naskenovaných součástí se primárně používají barevné mapy, které poskytují přehlednou a jednoduchou prezentaci výsledků měření. Tyto mapy jsou tvořeny na základě odchylky vůči nominální hodnotě. Vzniklé stereolitografické sítě ze všech třech měření byly vyrovnány na CAD model a porovnány s nominálním CAD modelem. Výsledné barevné mapy všech tří měření vytvořené na základě velikosti odchylek rozměrů jsou ve dvou pohledech zobrazené na obr. 6-48. Již na první pohled lze pozorovat, že jsou si tyto mapy velmi podobné. Dá se tak předpokládat, že vyrovnání dat i usazení krytů proběhlo při každé montáži správně. Součástí obrázku je barevná stupnice přiřazující každé odchylce konkrétní barvu dle její velikosti. Veškerá naměřená data leží v tolerančním poli ± 7 mm. Užší barevné pásmo je nastaveno tak, aby zelené odstíny odpovídali odchylkám v rozsahu ± 2 mm. Toto pásmo vypovídá o vysoké přesnosti polohy krytů. Na základě těchto map lze pozorovat, které kryty nebo jejich části leží v této dané toleranci. Ostatní kryty je nutné podrobit další analýze a zjistit důvody jejich nepřesné polohy.



Obr. 6-48 – Výsledné barevné mapy měření

6.7 Ověření způsobilosti

„Jednou z metod posuzování způsobilosti je stanovení schopnosti měřicího přístroje pomocí indexů způsobilosti C_g a C_{gk} . Tyto indexy vyhodnocují měřicí přístroj z hlediska opakovatelnosti. Ta představuje rozdíl mezi přijatou referenční hodnotou a střední hodnotou výsledků experimentů. Měření opakovatelnosti představuje blízkost shody mezi výsledky průběžných měření prováděných za stejných podmínek měření. Tento postup stanovení způsobilosti se používá u měřících přístrojů, při nichž nedochází k ovlivnění výsledků měření. Vychází z opakovaného měření vybrané velikosti výrobku, řídicí normy, jejíž jmenovitá hodnota leží ve středu tolerance měřeného parametru. Měření provádí jedna osoba s jedním měřením a stejným postupem v relativně krátkém časovém intervalu, přičemž se doporučuje provést 50 (nejméně 25) opakovaných měření. Při měření je nutné zajistit stejné podmínky. Předpokládá se, že výsledky měření jsou řízeny normálním rozdělením.“ [23]

$$\bar{x}_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.8.1)$$

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_g)^2} \quad (6.8.2)$$

$$C_g = \frac{0,2 \cdot T}{6s_g} \quad (6.8.3)$$

Z ekonomického a časového hlediska byly provedeny pouze 3 měření skenovací metodou pro stejné kryty a pouze jedním operátorem. Přestože vzorek dat je příliš malý, i tak lze získat orientační představu o způsobilosti upnutí krytů.

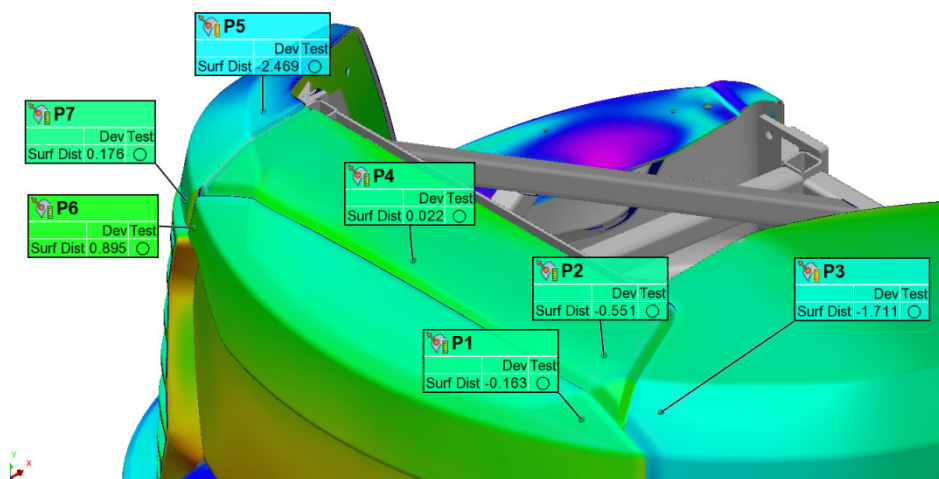
Pro ověření způsobilosti procesu upnutí krytů na přípravku bylo zvoleno 7 bodů (obr. 6-49), které jsou z hlediska vizuální kvality stroje důležité. Ze všech tří STL sítí získaných v předcházejících měření byly extrahovány hodnoty úchylek naměřených bodů vůči hodnotě nominální, tedy nulové hodnotě. Pro každý bod byl na základě tří hodnot vypočítán aritmetický průměr dle vztahu (6.8.1), směrodatná odchylka dle vzorce (6.8.2) a index způsobilosti C_g dle vztahu (6.8.3), který je uveden v tab. 6-4. [23]

Pro výpočet indexu způsobilosti je uvažována hodnota tolerance 2 mm.

Tab. 6-4 – Naměřené a vypočtené hodnoty

Tolerance T = 2 mm						
	Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3			
Bod č.	x_1 [mm]	x_2 [mm]	x_3 [mm]	\bar{x}_g [mm]	s_g [mm]	C_g [1]
1	-0,163	-0,151	-0,167	-0,160	0,008	8,064
2	-0,551	-0,505	-0,492	-0,516	0,031	2,151
3	-1,711	-1,782	-1,725	-1,739	0,038	1,773
4	0,022	0,112	0,103	0,079	0,050	1,345
5	-2,469	-2,524	-2,563	-2,519	0,047	1,412
6	0,895	0,802	0,875	0,857	0,049	1,362
7	0,176	0,214	0,255	0,215	0,040	1,687

Index způsobilosti C_g pro všech 7 bodů odpovídá hodnotě větší než 1,33 [23]. V bodech 1 a 2 je vyšší index způsobilosti C_g výrazně vyšší. Systém měření a upínání se tedy jeví způsobile.

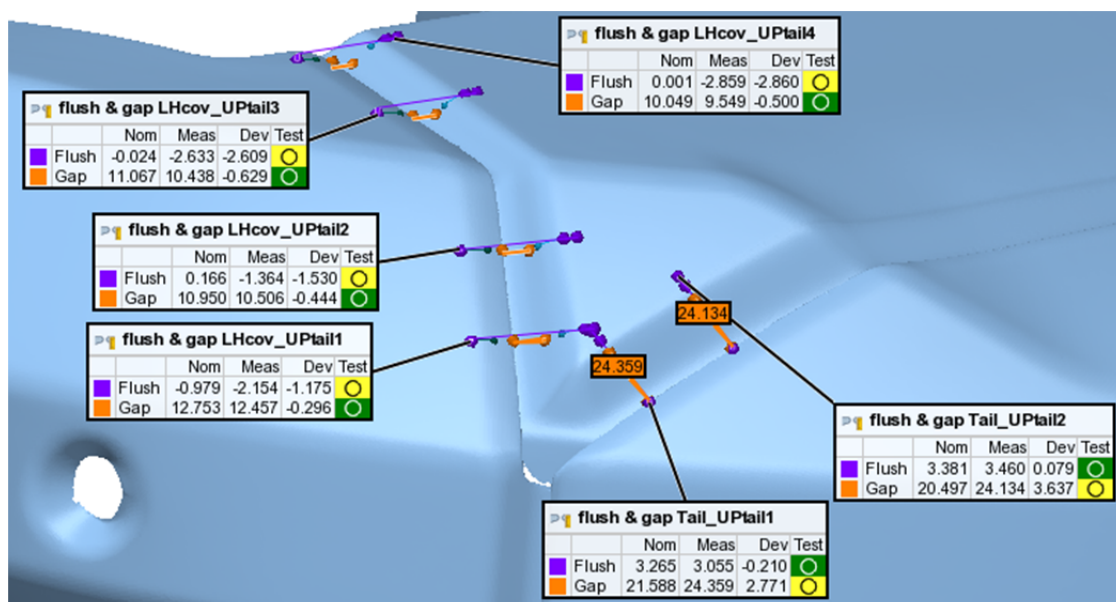


Obr. 6-49 – Polohy měřených bodů pro vyhodnocení způsobilosti upnutí krytů

6.8 Využitelnost měřicího přípravku

6.8.1 Kontrola mezer a přesahů (Flush&Gap)

Měření skenovací metodou všech vnějších krytů upnutých na přípravku přineslo možnost virtuální kontroly vzájemné polohy krytů a jejich lícování. Pomocí speciální funkce v software Polyworks Inspector lze provést analýzu Flush&Gap, které vyhodnocuje jednotlivé mezery a přesahy krytů vůči sobě, viz obr. 6-50. Touto metodou je možné nalézt kritická místa jejich vzájemné polohy a pokusit se odhalit vlivy těchto nedokonalostí.

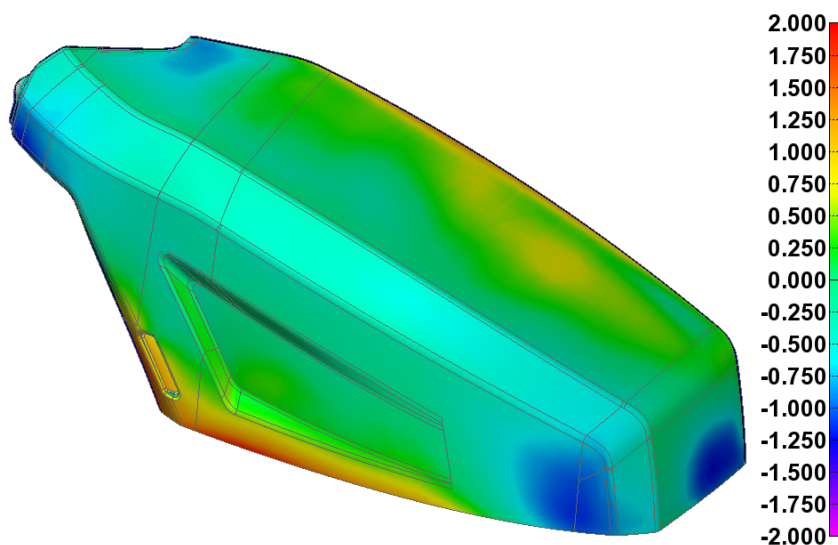


Obr. 6-50 – Kontrola mezer a přesahů krytů

6.8.2 Kontrola rozměrové kvality krytů

Na základě získaný STL sítí z provedených měření je možné vyhodnotit tvar, polohu a další předepsané specifikace pro jednotlivé kryty. Každý kryt může být vyhodnocen separátně a to vůči vyrovnání přípravku, nebo lze jeho data proložit metodou Best-fit přímo na konkrétní model součásti. Tím je možné ověřit tvarovou přesnost krytu bez vlivu vyrovnání. Pro názornost bylo provedeno vyrovnání STL sítě metodou Best-fit na CAD model krytu č. 4 zobrazený na obr. 6-51. Nastavená barevná mapa v toleranci ± 2 mm nám poskytuje informaci, že tvarové plochy tohoto krytu vyhovují dané toleranci. Lze však pozorovat problémová místa, ležící na jejích hraničních hodnotách.

Na základě ověření způsobilosti procesu lze konstatovat, že je proces způsobilý, a tedy i realizace tohoto typu měření je způsobilá.



Obr. 6-51 – Vyhodnocení tvaru samostatného krytu

6.9 Ekonomická analýza

Celkové náklady na výrobu rozšiřujících částí přípravků se pohybovaly okolo 150 tisíc Kč bez DPH.

Z hlediska technicko-ekonomické analýzy je znalost systému měření MSA důležitým zdrojem informací pro další vyhodnocování systému měření [23]. Před samotnou analýzou systému měření je nutné si zodpovědět několik následujících otázek:

- kterou veličinu/veličiny je potřeba sledovat/měřit a dále zpracovávat?
- které vlastnosti tato veličina ovlivňuje a naopak?
- jaké jsou nákladové položky (ztráty), pokud budou prováděny chybná nebo vůbec žádná měření?

V kapitole 6-8 byla provedena analýza systému měření, ve které byl vyhodnocen index způsobilosti C_g , který vyhovoval způsobilosti.

Po vyhodnocení analýzy systému měření jsou získány výsledky, pomocí nichž se vybírá metoda vyhodnocování bodů na krytu. V této počáteční fázi se odstraní nedostatky, které pomohou zajistit plnění požadavků na kvalitu.

7 ZHODNOCENÍ

Při rozměrové kontrole jednotlivých, nově vyrobených komponent došlo k vyhodnocení navržených specifikací dle výkresové dokumentace. Na základě uspokojivých výsledků měření lze konstatovat, že výrobní tolerance byly zvoleny vhodně pro proces obrábění, neboť skutečně naměřené hodnoty se převážně pohybují na hranici tolerančního pásma. Několik součástí však bylo vyrobeno mírně za hranou specifikace. Naměřené díly byly přimontovány na původní konstrukci přípravky do jeho finální podoby.

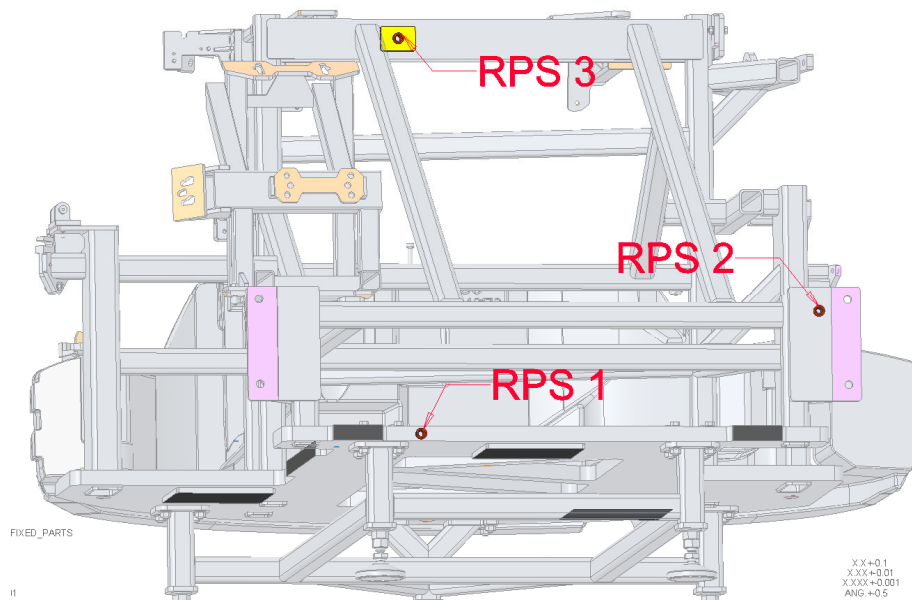
Kompletní přípravek prošel fází kontroly a následně kalibrací jednotlivých rozšiřujících částí. Během kalibrace nebylo možné dostatečně seřídít dosedací plochy některých usazených komponent z důvodu nevhodné volby konstrukčního návrhu přípravku. Tyto části přípravku byly nepřesně vyrobeny a do pozice jejich polohy se sečetly chyby těchto nepřesností a nepřesností původního přípravku. Pro realizaci přípravku v předepsané toleranci je nutné navrhnout optimalizační úpravu.

7.1 Finální optimalizace

Na základě zhodnocení dat a celého procesu měření krytů je vhodné navrhnout určitá optimalizační řešení, která odstraní nedostatky současné podoby přípravku. Tato řešení byla diskutována se zkušenými odborníky zabývající se návrhem měřicích přípravků v praxi. Tato část práce popisuje jednotlivé konstrukční úpravy přípravku, které firma Doosan Bobcat EMEA s.r.o. realizuje, avšak jejich dokončení se plánuje až po termínu odevzdání této diplomové práce.

7.1.1 Optimalizace vyrovnání přípravku

Pro vyrovnání přípravku během každého měření krytů slouží přesně obrobené plochy na původní konstrukci přípravku. Jedná se o šest referenčních ploch, na které se přípravek vyrovnává metodou ustavení 3-2-1. Přestože se jedná o velmi přesné plochy, jejich využití ve fázi měření krytů není vhodné. Během snímání bodů měřicím ramenem jsou tyto plochy obtížně dostupné, jelikož se nachází nevhodně na spodní části konstrukce a proces se stává pro operátora velmi nekomfortní. Hlavní motivací pro změnu je skutečnost, že vlivem manuálního měření se původní vyrovnání metodou 3-2-1 stává neopakovatelným. Vyrovnání na tyto plochy je zároveň komplikované i při nastavení resp. kalibraci přípravku.



Obr. 7-1 – Návrh RPS systému

Na základě poznatků získaných při zpracování teoretické části by měl být přípravek opatřen jednoduchým RPS systémem pro vyrovnání. Toho lze docílit instalací přesných kulových nebo válcovitých elementů, které při změření definují právě jeden bod. Pro

tento přípravek byla zvolena varianta v podobě tří rozměrově přesných, kalených válcových pouzder s krčkem. Pouzdra o vnitřním průměru 12 mm se nalisují do konstrukce přípravku v polohách zobrazených na obr. 7-1, které zajišťují dostatečný přístup k měření na stacionárním CMM i měřicím ramenem. Černě jsou zobrazeny plochy určené pro původní vyrovnání, které bude nahrazeno.

Aby mohl být tento systém nového vyrovnání aplikován, je zapotřebí přípravek přeměřit na stacionárním CMM. Po změření jednotlivých prvků se provede vyrovnání typu Best-fit na původní plochy vyrovnání včetně dalších pevných ploch, které slouží již přímo k upínání krytů. Toto vyrovnání zaručí nejlepší proložení prvků vůči modelu a vytvoří souřadnicový systém přípravku, který chceme zachovat. V tomto souřadnicovém systému se provede změření čelní plochy a vnitřní válcové plochy každého pouzdra. Proložením těchto prvků jsou vytvořeny středové body pouzder a jejich souřadnice x , y , z se nyní považují za nominální hodnoty pro RPS systém. Okolí každého pouzdra se opatří štítkem se zápisem těchto souřadnic a každé další vyrovnání se bude provádět na tyto body.

7.1.2 Úprava kritických částí přípravku

Na základě procesu nastavení neboli kalibrace měřicího přípravku a vyhodnocení nasbíraných dat při kontrole rozměrové přesnosti se došlo k závěru, že návrh rozšiřujících komponent přípravku byl navržen nevhodně a minimálně několik dílů vyžaduje další konstrukční úpravu. Zásadním nedostatkem při návrhu těchto komponent byl předpoklad, že všechny vyrobené součásti budou vyhovovat specifikaci. To se však nestalo a součet rozměrových nepřesností původní konstrukce a některých rozšiřujících součástí znemožnil nastavení dosedacích ploch do pozice uvnitř stanovené tolerance.

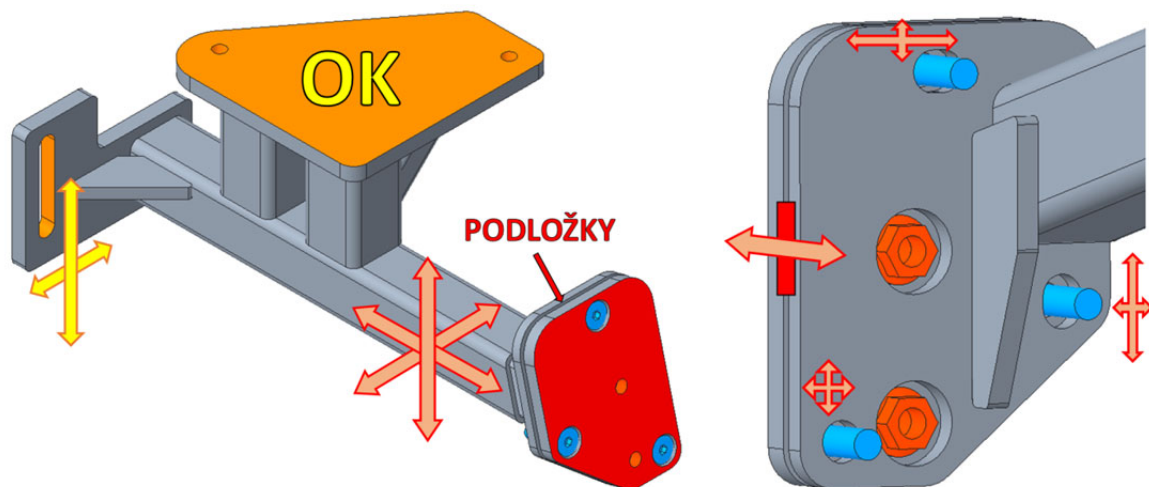
Toto řešení návrhu bylo v době vzniku projektu ve firmě Doosan Bobcat EMEA s.r.o. považováno za správné, neboť původním záměrem bylo vytvoření jednoduchého přípravku složeného z co nejmenšího počtu pevných obrobených součástí. Zde se však projevil vliv komplikovanosti návrhu a omezené zkušenosti s tvorbou komplexních přípravků. Jedná se o první realizaci toho typu měřicího přípravku ve firmě, čímž se pro ni tato práce stává velmi zajímavou a použitelnou pro budoucí návrhy obdobných přípravků.

Správný postup návrhu nejen měřicích přípravků by měl využívat koncept nastavitelných dosedacích a opěrných ploch. Jednotlivé funkční součásti by měli mít

možnost nastavitelnosti v předpokládaném rozsahu nepřesností. Tímto řešením lze dosáhnout velice přesných výsledků nastavení, a to až rozsahu pod toleranci 0,1 mm.

Z důvodů omezených finančních a časových prostředků pro optimalizaci celé konstrukce bylo nutné vybrat pouze kritické součásti, které se podrobí úpravě. Jako kritické prvky byly označeny části přípravku č. 1 (obr. 6-23) a č. 2 (obr. 6-24), jejichž šikmou plochou nebylo možné ustavit v mezích tolerance. Nejhorší polohy dle výsledků seřízení (obr. 6-35) dosáhla část č. 1, jejíž dosedací plocha značně přesahuje za hranici tolerančního pole.

Jako optimalizační návrh těchto komponent bylo zvoleno řešení s nastavitelnou šikmou dosedací plochou (na obr. 7-2 zvýrazněna červenou barvou), které poskytuje velkou možnost seřízení převyšující výrobní nepřesnosti. Dle naměřených dat zkalibrovaného přípravku nebylo nutné navrhnout úpravu oranžové vodorovné plochy, neboť její polohu, včetně pozice otvorů, lze nastavit správně v rámci vůlí šroubového spoje. Červená plocha má možnost seřízení své polohy ve všech směrech a seřizuje se až po usazení plochy oranžové. V normálovém směru se její poloha seřizuje podložkami, v dalších směrech pak šroubovými spoji.



Obr. 7-2 – Optimalizovaný návrh části přípravku č. 1

Přestože i ostatní části přípravku byly navrženy nevhodně, podařilo se je díky jejich přesnosti výroby a uvažovaných montážních vůlí ustavit do vyhovující polohy v rámci předem zvolených tolerancí. I když by se s lepším konstrukčním návrhem dosáhlo vyšší přesnosti, současná dosažená přesnost je pro danou aplikaci vyhovující a pro firmu Doosan Bobcat EMEA s.r.o. dostačující, neboť lze konstatovat, že přípravek zajišťuje pozici krytů o řád přesněji, než skutečná sestava stroje.

8 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na rozbor problematiky návrhu měřicích přípravků a realizaci měřicího přípravku pro kontrolu smontovatelnosti a rozměrové kvality vnějších krytů rypadla ve firmě Doosan Bobcat EMEA s. r. o.

První část práce se zabývala rozбором požadavků kladených na konstrukci přípravků a jejich funkčnost. Kapitola vysvětluje metody ustavení součástí v přípravcích, včetně popisu jednotlivých prvků, které se pro polohování využívají. Na tuto problematiku navazuje rozbor upínacích systémů a zařízení, bez nichž se přípravky neobejdou. Další část je zaměřená již na rozdělení a popis jednotlivých typů měřicích přípravků.

Další kapitola popisuje měřicí systémy, které slouží k rozměrové kontrole výrobků. Zde jsou popsány souřadnicové měřicí stroje využívané při zpracování praktické části.

Úkolem praktické části této diplomové práce byla realizace měřicího přípravku pro kontrolu vnějších krytů rypadla. Celý koncept návrhu přípravku byl založen na již vyrobené svařené konstrukci, která simulovala rám stroje. Tuto konstrukci označovanou jako „původní přípravek“ nebylo možné v dané podobě využít pro rozměrovou kontrolu, neboť její funkce odpovídala spíše přípravku pro simulaci montážních úkonů s využitím sériových součástí stroje. Proto musela být navržena konstrukční optimalizace toho přípravku s výrobou rozšiřujících komponent.

Po rozboru problematiky montáže vnějších krytů byl proveden postupný návrh jednotlivých rozšíření pro vyrobení finálního přípravku. Během vypracování diplomové práce vznikl požadavek na návrh jednotlivých komponent ve variantě pevné součásti s přesně obrobenými plochami. Tento návrh uvažoval s přesným usazením komponent na původní přípravek bez velkých možností nastavení ploch.

Celkový návrh obsahuje osm sestav komponent. Jejich postupný návrh byl založen na zkušenostech kolegů a podložen pevností analýzou metodou konečných prvků. Pro finální návrh přípravku byla provedena pevnostní analýza se simulací zátěže způsobené vlastní hmotností součástí přípravku a hmotností vnějších krytů. U dvou součástí došlo k deformaci až do 0,15 mm, jejíž hodnota však nebyla považována za kritickou.

Pro všechny komponenty byla vytvořena výrobní dokumentace využívající ISO kótování a tolerování, podle které byla provedena jejich následná rozměrová kontrola na stacionárních SMS. Po ověření jejich přesnosti se přešlo do fáze sestavení přípravku.

Sestavení přípravku začalo nejdříve montáží protizávaží, až poté byla provedena montáž jednotlivých částí přípravku. Zkompletovaný přípravek byl podroben měření a kalibraci, při které se dospělo k závěru, že několik součástí není možné ustavit do pozice vyhovující předem stanoveným tolerancím. Tyto části přípravku č. 1 a č. 2 byly označeny jako kritické. Pro realizaci montáže krytů a jejich montáže se však ponechaly na místě, aby mohl být realizován proces měření.

Na zkalibrovaný měřicí přípravek byla následně provedena montáž krytů, při které byla ověřena smontovatelnost krytů na přípravku. Kryty usazené na přípravku byly změřeny měřicím ramenem s laserovým skenerem a získané STL sítě byly zarovnány na CAD model pomocí vyrovnávacích ploch přípravku. Toto měření bylo opakováno 3x pro shodné kryty, vždy po jejich demontáži a opětovné montáži. Na základě změřených dat byly vytvořeny barevné mapy, ze kterých byla vyhodnocena způsobilost daného procesu. Pro 7 zvolených bodů a toleranci upnutí $T = 2$ mm byl vypočten index způsobilosti C_g , jehož hodnota byla vždy vyšší než 1,33. Proces se tak jeví jako způsobilý, avšak je třeba brát v úvahu nedostatečný počet dat pro správné vyhodnocení.

Přestože se proces měření pomocí přípravku jeví jako způsobilý, v daném stavu nemůže být určen pro sériovou výrobu a vyžaduje úpravu. Obecně lze říci, že rozšiřující části přípravku byly navrženy nevhodně. Jejich dosedací plochy by měly být dle konstrukčních zásad nastavitelné. U takto složitých návrhů přípravků dochází velmi často v počáteční fázi k nedostatkům, které se postupně optimalizují. Dané nedostatky návrhu byly odhaleny během konzultace s odborníky z praxe.

I přes nemožnost rozsáhlého nastavení se u většiny součástí dosáhlo pozice vyhovující předepsané toleranci. Ta obecně odpovídá o řád přesnější pozici dosedacích ploch, než je tomu na skutečném stroji. Z těchto důvodů se návrh přípravku zachoval, pouze došlo k úpravě kritických částí č. 1 a č. 2, které jsou pro funkčnost přípravku stěžejní. Jejich optimalizační řešení využívá nastavitelnou šikmou dosedací plochou. Tyto části jsou v současné době ve výrobě. Další řešením optimalizace přípravku je návrh nového vyrovnání v podobě RPS systému. Současné vyrovnání metodou 3-2-1 není při manuálním měření opakovatelné, a navíc se provádí obtížně. RPS systém bude realizován pomocí tří kalených pouzder zalisovaných do rámu přípravku. Tato úprava přípravku je již také zadána do výroby. Na základě nasbíraných dat a navržených optimalizací lze považovat cíle této diplomové práce za splněné, včetně realizace měřicího přípravku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Nová 5–6tunová mini rypadla Bobcat řady R2. *Stavební portál TVstav.cz* [online]. 2021 [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://tvstav.cz/clanek/6281-nova-5-6tunova-mini-rypadla-bobcat-rady-r2>
- [2] Brožura E50z, E55z, E60z. *Stavební stroje Bobcat Doosan* [online]. 2021 [cit. 2021-08-06]. Dostupné z: https://www.bobcat.cz/sites/default/files/downloads/e50z_e55z_e60_brochure_eng_preliminary_2021_01.pdf
- [3] *E50z Specifications & Options*. [online]. 2021 [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://www.bobcat.com/eu/excavators/models/e50z/specs-options>
- [4] CHVÁLA, Břetislav a Josef VOTAVA. *Přípravky*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1980.
- [5] RUFÉ, Philip. *Fundamentals of Manufacturing: 38. Fixture and Jig Design* [online]. 3rd Edition. Society of Manufacturing Engineers, 2013 [cit. 2021-08-06]. ISBN 9780872638709.
- [6] FOIX, Xavier a Gladys BECERRA. *How to Write Technical Specifications - Handbook* [online]. In: . Tecnomatrix, 2010, s. 28 [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: https://www.tecnomatrix.com/wp-content/uploads/downloads/manuals/howto_write_tech_specs.pdf
- [7] NOVOTNÝ, Karel a Oskar ZEMČÍK. *PŘÍPRAVKY A NÁSTROJE* [online]. [cit. 2021-08-06]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8221273-Pripravky-a-nastroje.html>
- [8] PEŇÁK, Vlastimil. *Návrh kontrolního přípravku pro plastový výrobek interiéru osobního vozidla*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [9] Modular fixturing for metrology. *Alukeep GmbH* [online]. 2020 [cit. 2021-08-07]. Dostupné z: https://alukeep.com/company_presentation2020.pdf
- [10] Bumper checking fixture. *Tecnomatrix* [online]. 2021 [cit. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.tecnomatrix.com/checking-fixtures/front/front-bumper-assembly/>
- [11] MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVKY A CUBINGY. *CAPGEMINI ENGINEERING* [online]. [cit. 2021-08-06]. Dostupné z: https://www.altran.com/cz/cs/integrated_solution/merici-pripravky-a-cubingy/
- [12] Modulární upínací systémy ALUFIX. *ESPERANTO* [online]. 2021 [cit. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.esperantomb.cz/modularni-upinaci-systemy-alufix.html>

- [13] BERÁNEK, Libor. *Průmyslová metrologie: Studijní podklady* [online]. In: . ČVUT FS, 2019 [cit. 2021-08-04].
- [14] PURKART, Martin. *Využití souřadnicové měřicí techniky v oblasti kontroly kvality*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [15] ALPHA - Flexibilní, dostupné a přesné mostové SMS. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2021 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms/dea-alpha>
- [16] TIGO SF. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/coordinate-measuring-machines/shop-floor-cmms/tigo-sf>
- [17] *Technické brožury SMS*. Doosan Bobcat EMEA s.r.o. 2018. Dostupné také z: interní dokument
- [18] Laserový skener RS5. *Hexagon Manufacturing Intelligence*. [online]. 2021 [cit. 2021-08-01].
- [19] 7osé rameno Absolute Arm. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2021 [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/portable-measuring-arms/absolute-arm-7-axis>
- [20] ŠILINGER, Martin. *Návrh upínacího přípravku pro kontrolu geometrických specifikací kapotáže mini rypadla na CMM*. Praha, 2021. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [21] Lícované šrouby s dlouhým závitovým čepem šestihran, DIN 609. In: *Norelem* [online]. 2021 [cit. 2021-08-07]. Dostupné z: https://www.norelem.com/xs_db/BILD_DB/Z/Z0/Z07/www/750/Z07535.jpg
- [22] Lícované šrouby s osazením podle DIN ISO 7379. In: *Norelem* [online]. 2021 [cit. 2021-08-07]. Dostupné z: https://www.norelem.com/xs_db/BILD_DB/Z/Z0/Z07/www/750/Z07534.jpg
- [23] VALENTOVÁ, Karolína. *Vliv metod měření a kontroly kvality na kvalitu výroby v procesu obrábění*. 2017. Bakalářská práce. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [24] Workholding solutions, Equipment & Products. *Fixtureworks* [online]. 2021 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: <https://www.fixtureworks.com/store/pc/home.asp>
- [25] *Dokumenty projektu K2*. Doosan Bobcat EMEA s.r.o. 2020. Dostupné také z: interní dokument

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 – Rypadlo Bobcat E50z [2]	10
Obr. 2-2 – Rozměry rypadla Bobcat E50z [3]	10
Obr. 3-1 – Stupně volnosti tělesa [5]	12
Obr. 3-2 – Metoda ustavení 3-2-1 [5]	12
Obr. 3-3 – Ustavení součásti [5]	13
Obr. 3-4 – Vestavěný a montovaný opěrný prvek [5]	14
Obr. 3-5 – Pevné opěrné čepy [5]	15
Obr. 3-6 – Kontrolní přípravek pro CMM [10]	22
Obr. 3-7 – Vnější Meisterbock [12]	24
Obr. 4-1 – Rozdělení stacionárních CMM [13]	27
Obr. 4-2 – Rozdělení mobilních CMM [13]	28
Obr. 5-1 – Měřicí stroj DEA Aplha 2.0 [17]	29
Obr. 5-2 – Měřicí stroj TIGO SF [16]	30
Obr. 5-3 – Měřicí rameno Absolute Arm s laser skenerem [24]	31
Obr. 6-1 – Kryt 1	34
Obr. 6-2 – Kryt 2	34
Obr. 6-3 – Kryt 3	34
Obr. 6-4 – Kryt 4	34
Obr. 6-5 – Kryt 5	34
Obr. 6-6 – Kryt 6	34
Obr. 6-7 – Kryt 7	34
Obr. 6-8 – Kryt 8	34
Obr. 6-9 – Požadavek montáže na vizuální kvalitu stroje [25]	35
Obr. 6-10 – Složitost montáže krytů [25]	35
Obr. 6-11 – Rám rýpadla	36
Obr. 6-12 – Původní podoba přípravku	36
Obr. 6-13 – Měření původního přípravku	37
Obr. 6-14 – Lícovaný šroub DIN 609 [21]	41
Obr. 6-15 – Lícovaný šroub ISO 7379 [22]	41
Obr. 6-16 – Deformace nevhodného návrhu	43
Obr. 6-17 – Deformace vyztuženého návrhu	43
Obr. 6-18 – Deformace vlivem vlastní hmotnosti	43
Obr. 6-19 – Deformace vlivem hmotností krytů	43

Obr. 6-20 – Celková deformace přípravku	44
Obr. 6-21 – Nejvíce deformovaná část přípravku.....	44
Obr. 6-22 – Výrobní výkres jedná z navržených součástí	45
Obr. 6-23 – Část přípravku č. 1	46
Obr. 6-24 – Část přípravku č. 2	46
Obr. 6-25 – Část přípravku č. 3	46
Obr. 6-26 – Část přípravku č. 4	47
Obr. 6-27 – Část přípravku č. 5	47
Obr. 6-28 – Část přípravku č. 6	47
Obr. 6-29 – Část přípravku č. 7	47
Obr. 6-30 – Část přípravku č. 8	47
Obr. 6-31 – Měření součásti na TIGO SF s využitím sady Swift-Fix	48
Obr. 6-32 – Grafické znázornění měřené součásti v PC-DMIS	48
Obr. 6-33 – Měření vnitřních závitů	49
Obr. 6-34 – Kompletní měřicí přípravek	50
Obr. 6-35 – Rozměrová kontrola přípravku 1/6	51
Obr. 6-36 – Rozměrová kontrola přípravku 2/6	51
Obr. 6-37 – Rozměrová kontrola přípravku 3/6	52
Obr. 6-38 – Rozměrová kontrola přípravku 4/6	52
Obr. 6-39 – Rozměrová kontrola přípravku 5/6	53
Obr. 6-40 – Rozměrová kontrola přípravku 6/6	53
Obr. 6-41 – Předmontáž krytu č. 1.....	54
Obr. 6-42 – Předmontáž krytu č. 4.....	54
Obr. 6-43 – Skenování krytů pomocí měřicího ramene.....	55
Obr. 6-44 – Ruční před-vyrovnaní dvou mraků bodů	56
Obr. 6-45 – Výsledné zarovnání dvou mraků bodů.....	56
Obr. 6-46 – Kompletní naskenované body	56
Obr. 6-47 – Referenční plochy pro vyrovnaní přípravku	57
Obr. 6-48 – Výsledné barevné mapy měření	58
Obr. 6-49 – Polohy měřených bodů pro vyhodnocení způsobilosti upnutí krytů.....	60
Obr. 6-50 – Kontrola mezer a přesahů krytů	61
Obr. 6-51 – Vyhodnocení tvaru samostatného krytu.....	62
Obr. 7-1 – Návrh RPS systému.....	64
Obr. 7-2 – Optimalizovaný návrh části přípravku č. 1	66

SEZNAM TABULEK

Tab. 5-1 – Parametry stroje DEA Alpha 2.0 [15].....	29
Tab. 5-2 – Parametry SMS TIGO SF [16].....	30
Tab. 5-3 – Parametry měřicího ramene Absolute Arm 8530 [19].....	32
Tab. 6-1 – Vybrané geometrické tolerance aplikované na výkresech	45
Tab. 6-2 – Zvolené mezní tolerance přípravku.....	50
Tab. 6-3 – Postup montáže krytů na přípravku.....	55
Tab. 6-4 – Naměřené a vypočtené hodnoty	60

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Protokol měření rámu původního přípravku

Příloha B – Výrobní dokumentace navržených součástí

Příloha C – Protokol měření navržených součástí