

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY DÍLCŮ S VNITŘNÍ STRUKTUROU

**HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGY OF COMPONENTS WITH AN INTERNAL
STRUCTURE**

AUTOR: Ondřej Košťál

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Pelikán Lukáš

VEDOUCÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI: Ing. Winterberg Simon

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Košťál** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **483336**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Hybridní technologie výroby dílců s vnitřní strukturou

Název bakalářské práce anglicky:

Hybrid technology manufacturing of components with an internal structure

Pokyny pro vypracování:

- 1) Hybridní stavby - kombinace aditivních technologií a obrábění
- 2) Výroba hydraulické komponenty za pomoci hybridní technologie
- 3) Testování vlastností hydraulické komponenty vyrobené hybridní technologií

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Pelikán, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Lukáš Pelikán
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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Ondřej Košťál

Abstrakt

Cílem bakalářské práce bylo ověření možnosti použití aditivní technologie 3D tisku kovu pro výrobu hybridní hřídele pro testovací zařízení na ozubená kola a ověření funkčnosti hydraulického upínání.

Hlavním cílem byla výroba hřídele pomocí kombinace konvenčního obrábění a technologie 3D tisku. V rámci práce byla hřídel testována, optimalizována a vyhodnocena pro použití v pracovním zatížení. Závěrem byly navrženy vhodné změny celého konstrukčního uspořádání. Zvláštní pozornost byla věnována především testování upínací síly hydraulického systému.

První část práce se věnuje teoretickým předpokladům nezbytným pro řešení dané problematiky, která se zabývá způsobem aditivních technologií a hybridní přípravou strojních součástí. Dále je proveden rozbor dané situace konstrukce hybridní hřídele a navržen postup výroby i testování funkčnosti celého systému. Následuje praktické řešení vytyčeného problému, při kterém se podařilo vyrobit hybridní hřídel pomocí kombinace technologií obrábění a 3D tisku. Hřídel byla testována a byla prokázána schopnost dílce jednorázově zajistit fungování při pracovní zátěži. Nakonec byly řešeny nedostatky, jež se objevily při montáži, které by při následujícím užívání dílce zapříčinily jeho poruchu. Závěrem byly navrženy změny a doporučení pro optimalizaci řešení hybridní výroby dílců s vnitřní strukturou a zhodnocení celé problematiky.

Klíčová slova:

hybridní hřídel, aditivní výroba, 3D tisk kovů, hydraulické upínání

Annotation

Bachelor thesis aimed to optimize and verify the use of additive technology of metal 3D printing and hybrid shaft construction for test equipment for gears.

The main goal was to manufacture the shaft using a combination of conventional machining and 3D printing technology. As part of the work, the shaft was tested, optimized, and evaluated for use in workloads. Finally, suitable changes to the entire structural arrangement were proposed. Special attention was paid to testing the clamping force of the hydraulic system.

The first part of the work deals with the theoretical assumptions necessary for solving the problem, where the method of additive technologies and preparation of hybrid machine parts are discussed. Furthermore, the analysis of the given situation of the hybrid shaft construction is performed, and the production procedure and testing of the whole system's functionality are proposed. The following is a practical solution to the given problem, in which it was possible to produce a hybrid shaft using a combination of machining and 3D printing technologies. The shaft was tested and the ability of the part to ensure one-time operation under workload was proved. Finally, the shortcomings that appeared during the assembly, which could cause its failure during the subsequent use of the part were solved. Ultimately, changes and recommendations were proposed for optimizing the hybrid production of components with an internal structure and an evaluation of the whole issue was made.

Keywords

hybrid shaft, additive production, 3D metal printing, hydraulic clamping

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce **Ing. Lukášovi Pelikánovi**, stejně tak i vedoucímu praktické části na zahraniční univerzitě **Ing. Simonu Winterbergovi** za odborné vedení a pohotové řešení problémů, které se při tvorbě bakalářské práce vyskytly. Dále bych chtěl poděkovat **Ing. Pavlíně Hájkové, Ph.D.** za odbornou pomoc a vstřícnost. V neposlední řadě bych rád poděkoval i své rodině, zejména svým rodičům, kteří mě po celou dobu studia maximálně podporovali.

Obsah

ÚVOD	10
1 CÍLE PRÁCE	11
2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA	12
2.1 Aditivní technologie – 3D tisk	12
2.2 3D tisk kovů	14
2.2.1 Historie	14
2.2.2 Výhody a využití	14
2.2.3 Technologie 3D tisku kovů	15
2.3 Hybridní aditivní konstrukce	19
2.4 Hydraulické upínací systémy	21
3 VÝROBA HYBRIDNÍ HŘÍDELE (řešená problematika).....	22
3.1 Počáteční podmínky	22
3.2 Seznam použitých dílů.....	24
3.2.1 Seznam nakoupených komponent	24
3.2.2 Seznam vyrobených dílů (podle předem navrženého postupu).....	25
3.2.3 Seznam dílů mnou navržených a vyrobených	25
3.3 Výroba součástí	26
3.3.1 Hybridní hřídel	26
3.3.2 Čepy, adaptér, testovací adaptér (A1) a (A2)	28
3.3.3 Trychtýř	28
4 TESTOVÁNÍ HYBRIDNÍ KONSTRUKCE	30
4.1 Sestavení systému	30
4.2 Obecné podmínky testů	31
4.3 Test 1	32
4.3.1 Optimalizace testování funkčnosti hydraulického upínání hřídele	32
4.3.2 Optimalizovaný postup odvzdušnění.....	33

4.4	Test 2.....	34
4.5	Test 3.....	38
4.6	Test 4.....	40
5	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	42
5.1	Návrh změny konstrukčního řešení.....	43
5.1.1	Přidání zajišťovacích čepů.....	43
5.1.2	Výměna hydraulického média.....	43
5.1.3	Navržení lepšího řešení šroubu a těsnění.....	44
	ZÁVĚR.....	45
	REFERENCE.....	46
	Seznam obrázků.....	49
	Seznam tabulek.....	50
	PŘÍLOHY.....	52
	Seznam příloh.....	52

SEZNAM ZKRATEK

3D	– Three Dimensional
A1	– Testovací adaptér 1
A2	– Testovací adaptér 2
BJ	– Binder Jetting
BPE	– Bound Powder Extrusion
CAD	– Computer Aided Design
CAM	– Computer Aided Manufacturing
CNC	– Computer Numerical Control
DED	– Direct Energy Deposition
DMLS	– Direct Metal Laser Sintering
FDM	– Fused Deposition Modeling
ME	– Material Extrusion
MJ	– Material Jetting
ml	– mililitr
Nm	– Newton metr
PBF	– Powder Bed Fusion
PLA	– Polylactic acid
SLA	– Stereolithography
SLM	– Selective Laser Melting
SLS	– Selective Laser Sintering
VP	– Vat Photopolymerization
ZPP	– Centrum pro vývoj produktů a procesů

ÚVOD

Tato bakalářská práce vznikla na základě spolupráce Fakulty strojní (České vysoké učení technické v Praze) a Centra pro vývoj produktů a procesů (dále jen ZPP) na School of Engineering (Zurich University of Applied Sciences), kde byla realizována praktická část.

Aditivní technologie, mezi něž patří především 3D tisk, jsou v porovnání s jinými technologiemi výroby poměrně mladou skupinou a v poslední době u nich dochází k prudkému rozvoji. Díky možnosti kombinovat aditivní procesy s konvenční výrobou vzniká celá řada nových konstrukčních řešení, které by jinak nebyly možné. Jedním z nich je i možnost vyrábět dílce se složitou vnitřní strukturou, mezi které patří hydraulické systémy.

Při výrobě hydraulických systémů se čím dál tím častěji rozhoduje mezi použitím klasických slévárenských technologií nebo 3D tisku, díky kterému si můžeme dovolit velmi malé rozměry integrovaných hydraulických systémů. Slévárenské dílce jsou sice cenově výrazně levnější, ale omezují výrobu na úzké spektrum materiálů. Oproti tomu 3D tisk umožňuje výrobu hydraulických systémů z kovových materiálů, které je problematické či přímo nemožné odlévat do forem. Technologií 3D tisku kovu můžeme navíc „nastavit“ kovové součásti vyrobené klasickou technologií a docílit vzájemného kohezního propojení v jeden hybridní celek. Takovým systémem je například i hřídel s integrovanou funkcí hydraulického upínání, kterou se zabývá tato bakalářská práce.

V Centru pro vývoj produktů a procesů, které je součástí Curyšské univerzity, jsem se v rámci studijního pobytu zabýval problematikou náhrady současné hřídele pro testovací zařízení na ozubená kola. Původní řešení neumožňovalo snadnou změnu pro testování různých průměrů ozubených kol. V případě potřeby testování jiného průměru ozubeného kola, byla nutností výměna adaptéru v testovacím zařízení. Pro výměnu adaptéru bylo nutné rozebrat celou převodovou skříň a celý proces byl velmi časově náročný. Proto bylo navrženo řešení pomocí hybridní hřídele s hydraulickým upínacím systémem, které by celý proces výměny adaptéru výrazně urychlilo. Toto řešení bylo rozvrženo do tří navazujících celků, kterým se věnovalo několik studentů. Mým úkolem a zároveň podstatou bakalářské práce byla druhá fáze. První fáze se věnovala teoretickému návrhu hybridní hřídele s hydraulickým upínacím systémem. Úkolem mé druhé fáze bylo ověřit možnost použití aditivní technologie 3D tisku k výrobě hybridní hřídele, resp. hydraulické části s velmi jemným kanálkovým systémem, otestování a optimalizace funkčnosti nového řešení a navržení konstrukčních změn na základě výsledků testů.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo ověření možnosti použití aditivní technologie 3D tisku kovu pro výrobu hybridní hřídele pro testovací zařízení na ozubená kola a ověření funkčnosti hydraulického upínání.

Proto byly stanoveny i dílčí cíle, které vedou k úspěšnému řešení vytyčeného problému.

- Rešerše odborné literatury na téma použití aditivních technologií pro hybridní konstrukce.
- Výroba hřídele podle předem navrženého postupu kombinací konvenčního obrábění a aditivní technologií 3D tisku.
- Sestavení hydraulického upínacího systému, jehož hlavní součástí je vyrobená hybridní hřídel.
- Testování systému při provozním zatížení.
- Navržení změn a dalších testů k optimalizaci konstrukce upínacího systému.
- Vyhodnocení a diskuze výsledků.

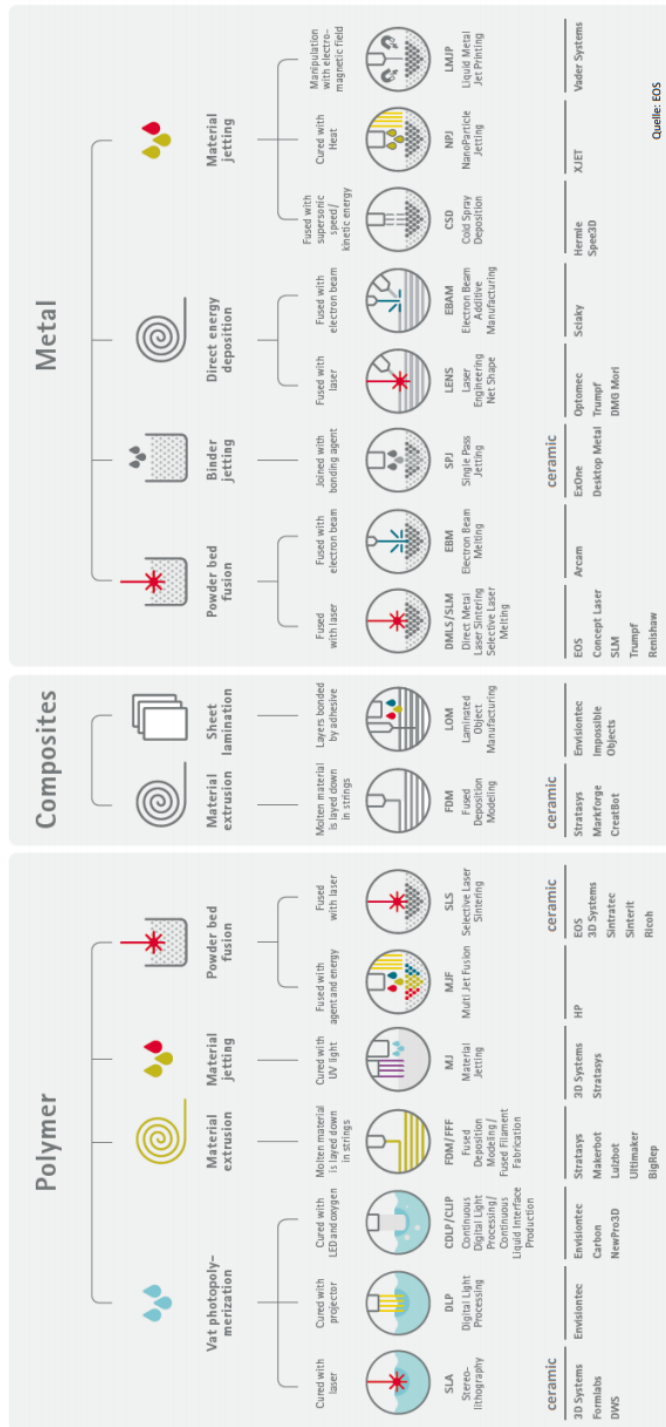
2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

2.1 Aditivní technologie – 3D tisk

Ve strojírenství je několik možných přístupů, jak vyrábět produkty. Aditivní proces výroby, kterým je například 3D tisk, tvoří výrobky pomocí přidávání materiálu vrstvu po vrstvě, oproti konvenčním způsobům výroby, kterými jsou například třískové obrábění, tváření či slévárenství. Zvláštní možností je pak kombinace konvenčních způsobů výroby s aditivními způsoby, při kterých výsledná součást vznikne například kombinací obrábění a 3D tisku. Tento způsob byl použit i při řešení bakalářské práce.

Aditivní technologie neboli také 3D tisk je výroba třídimenzionálního tělesa na základě dat digitálního modelu. Principem této metody je postupné přidávání materiálu po jednotlivých malých vrstvách o stejné tloušťce až do zhotovení finálního tvaru součásti. Nejčastěji se s ní setkáme u funkčních prototypů, neboť poskytuje možnost zhotovení velké škály výrobků za velmi krátký čas [1]. V posledních letech se aditivní technologie rapidně rozšířila a stává se z ní běžná součást výroby [2]. Stejně jako konvenční způsoby výroby využívá aditivní výroba modelů CAD (Computer-Aided Design). Data pro 3D tisk mohou vzniknout pomocí 3D programu (např. Catia, Inventor, SolidWorks atd.), nebo 3D skenováním fyzického modelu vyráběné součásti.

Rozdělení 3D tisku je možné podle typu materiálu a dle typu technologie. Běžně se tisknou polymery, kovy a kompozitní materiály včetně keramiky. Rozdělení 3D tisku dle tisknutých materiálů a technologií je na Obr. 1.



Obr. 1: Rozdělení aditivních technologií [27]

Z Obr. 1 vyplývá, že lze použít 7 základních technologií 3D tisku. Z těchto sedmi kategorií používáme pro 3D tisk kovu čtyři. Jedná se o Powder Bed Fusion (PBF), Binder Jetting (BJ), Direct Energy Deposition (DED), Sheet Lamination (SL). Zbylé tři kategorie Vat Photopolymerization (VP), Material Extrusion (ME) a Material Jetting (MJ) se používají především k tisku z polymerů nebo kompozitních materiálů [3]. Vlivem rychlého vývoje v této oblasti jsou nalézána stále nová řešení, která se nevyskytují ani na Obr. 1. Jedním z nich je např.: Bound Powder Extrusion (BPE).

Produkty, které byly vyrobeny procesem 3D tisku vyžadují ve většině případů určitou formu dokončení, aby dosáhli své finální podoby. Mezi takové procesy patří například: tryskání, odstraňování podpěr, broušení nebo aplikace povrchových vrstev. Především u kovových materiálů je pak velmi důležité tepelné zpracování, které odstraňuje zbytková pnutí nahromaděná vlivem tavení a rychlým tuhnutím jednotlivých vrstev materiálu.

2.2 3D tisk kovů

2.2.1 Historie

Vynález kovového 3D tisku navazoval na vývoj tisku polymerních materiálů. Za počátek této aditivní technologie se považuje konec osmdesátých let minulého století s vynálezem stereolitografie (SLA) Charlesem Hullem (1990) a modelování depozicí taveniny (FDM) od Scotta Crumpa (1991). Oba procesy byly použity k tvorbě třírozměrných předmětů vrstvením polymerů na sebe [3].

Proces 3D tisku kovů započal na začátku devadesátých let s vynálezem tiskové hlavy umožňující dopravu pojiva na jednotlivé vrstvy práškového materiálu (Binder Jetting) od Elyho Sachse a jeho spolupracovníků [4]. V polovině let devadesátých se rozšířil i vývoj vysoce výkonných laserů, které je možno použít pro zpracování kovových prášků. Tento proces se později vyvinul v takzvané přímé laserové slinování (DMLS – Direct Metal Laser Sintering) [5]. Kolem roku 1998 pak vynalezl Carl Deckard proces zvaný selektivní laserové slinování (SLS – Selective Laser Sintering) [6]. Dalším důležitým bodem pro vývoj 3D tisku kovů se stalo představení elektronového paprsku jako tepelného zdroje. Tento objev pochází ze Švédska [7]. Jen o pár let později (1992, souběžně s vývojem laserů, představil Dickens proces zvaný 3D svařování. Od této doby došlo v oblasti kovového 3D tisku k velkému množství dalších objevů a výzkumů, které významně ovlivnily odvětví.

2.2.2 Výhody a využití

3D tisk kovů má oproti konvenčním technologiím mnoho výhod, jako je možnost výroby tvarově složitých součástí, mezi které patří např.: nestandardní dutiny, negativní úkosy nebo typologicky upravené součásti. Při volbě konvenční technologie je nutné takové součásti nejdříve vhodně upravit. Je nezbytné myslet na dostatek místa pro obráběcí nástroje nebo na možnosti upnutí obrobků. Pro výrobu součástí s tvarově složitými dutinami či kanály je vhodné použít odlévání kovu do forem s jádry či na vytavitelné modely. Zde je však především pro kusovou výrobu velkým omezením náročná výroba modelového zařízení a volba dělicích rovin.

Pro odlévání lze navíc použít jen omezené množství kovů s dobrými slévárenskými vlastnostmi. To může být v mnohých případech limitující pro dosažení ideálního tvaru [8].

Využití 3D tisku, především pro kusovou a malosériovou výrobu, nemusí být ani dražší variantou s přihlédnutím na to, že pro dosažení podobného tvaru u konvenčních technologií je nutné použít několika specifických zařízení. Při přihlédnutí na transport mezi různými výrobními procesy, které jsou u tvarově komplikovaných výrobků nutné, použití 3D technologie může v konečném důsledku ušetřit čas i celkové náklady na výrobu.

Na druhou stranu mezi nevýhody 3D tisku patří náchylnost ke smršťování, vysoké pořizovací náklady nebo vznik vnitřních pnutí [9].

Aditivní výroba kovových součástí pomocí 3D tisku se s ohledem na finanční náročnost využívá především v následujících aplikacích: výroba odlehčených dílů, malosériová a prototypová výroba, díly s velkou tvarovou složitostí a individuální výroba na zakázku.

Výroba odlehčených dílů, zvláště v leteckém a automobilovém průmyslu, klade důraz na minimální hmotnost. Výrobci (např. Boeing) se snaží ušetřit každý gram hmotnosti konstrukce, aby snížili spotřebu paliva. Využívají k tomu příhradových a bionických struktur, díky kterým lze docílit minimální hmotnosti dílu. Druhou oblastí je malosériová a prototypová výroba. V těchto případech se těží z rychlosti výroby přímo z CAD souborů a možnosti vyrábět díly bez specifických obráběcích strojů. Další užití, u kterého dává aditivní výroba smysl, je u dílů s velkou tvarovou složitostí, kde potřebujeme integrovat do konstrukce dostatečné množství funkcí. Takovým dílem může být například část obráběcího nástroje s chladicími kanály. Poslední oblastí je individuální výroba na zakázku. Zde se jedná především o implantáty nebo dentální výrobky. Tyto produkty jsou zhotoveny na míru konkrétnímu zákazníkovi [1].

2.2.3 Technologie 3D tisku kovů

V současné době rozlišujeme pět základních možností přímého 3D tisku kovů. Jedná se o technologii Powder Bed Fusion (PBF), Sheet Lamination (SL), Direct Energy Deposition (DED), Binder Jetting (BJ) a Bound Powder Extrusion (BPE).

2.2.3.1 Technologie „Powder Bed Fusion“ (PBF)

Do češtiny by se dala tato technologie přeložit jako „tavení kovového prášku ve vaně“, avšak většinou se užívá anglický název Powder Bed Fusion (PBF). PBF je v současné době nejčastějším způsobem, jakým se dají tisknout 3D součásti z kovu. Podstatou této technologie je, že tiskárna vytváří kovové součásti pomocí spékání jednotlivých vrstev práškového kovu

pomocí soustředěného tepelného zdroje dle zadaných 3D dat [10]. Data pro tuto technologii se získají rozdělením finální geometrie výrobku na jednotlivé vrstvy.

Sled operací technologie BPF:

1. rozprostření vrstvy materiálu, nejčastěji o tloušťce 0,1 mm na výrobní platformu;
2. natavení první vrstvy materiálu pomocí tepelného zdroje dle zadaných 3D dat;
3. vertikální posun platformy;
4. rozprostření nové vrstvy materiálu o stejné tloušťce na výrobní plochu [11].

O rozprostření prášku na pracovní plochu se stará zarovnávací válec. Z hlediska výchozích kovových práškových materiálů se nejčastěji používají prášky z nerezové oceli, titanu nebo hliníku.

Podle technologie tepelného zdroje pak dále dělíme tuto metodu do dvou podskupin na Selective laser melting (SLM) a Electron Beam Melting (EBM)

Selective laser melting (SLM)

Tato metoda je známa také pod názvy: Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Printing (DMP), Laser Powder Bed Fusion (LPBF).

SLM je technologie, která využívá k tavení jednotlivých vrstev vysoce výkonné lasery. Po dokončení tisku je součást operátorem vyjmuta z pracovního prostoru a odříznuta od základní desky. Následují dokončovací operace, jakými mohou být např. tryskání nebo broušení. Výrobky zhotovené pomocí této technologie se vyznačují vysokou přesností a schopností tvořit komplexní komplikované stavby, které by jinou technologií nebylo možno zkonstruovat. Mezi další výhody SLM technologie patří schopnost vyrábět široké spektrum velikostí výrobků. Přesnost technologie je udávána šířkou laserového paprsku a tloušťkou jedné vrstvy [12]. Technologie SLM je zobrazena na Obr. 2 b).

Nevýhodou těchto zařízení je poměrně složitá obsluha a nutnost dokončovacích úprav, především tepelného zpracování, kvůli redukci vnitřních pnutí. Navíc je zavedení této technologie finančně náročné a je nutné dodržovat přísná bezpečnostní opatření [12].

Tato technologie byla použita i na výrobu hybridní hřídele v rámci mé bakalářské práce. Byla vybrána především z důvodů kompatibility tisknutého materiálu s materiálem obráběné části hybridní hřídele a pro možnost umístění a ukotvení již obrobene části výrobku do vany 3D

tiskárny. S ohledem na důležitost finálních vlastností navrhované hřídele bylo nezbytné sladit materiál na obráběné části výrobku s tištěným materiálem.

Electron Beam Melting (EBM)

U této technologie se k tavení kovového prášku využívá elektronového paprsku. Chua uvádí, že výsledné vlastnosti dílu vyrobeného touto metodou jsou oproti jiným metodám lepší, díky rovnoměrnému rozložení teploty během fúze [13]. Proto technologie našla uplatnění v leteckém průmyslu a v lékařských aplikacích [11]. Další výhodou metody EBM je rychlost technologie. Na druhou stranu tavení elektronovým paprskem není tak přesné v porovnání s technologií SLM. Díky rovnoměrnému rozložení teploty během fúze by tato metoda byla vhodnou alternativou k SLM a tisku hřídele, které se věnuje tato práce. Povrch vnitřní struktury hydraulického systému by však byl v porovnání s technologií SLM horší, což by mohlo omezit funkčnost celého systému.

2.2.3.2 Technologie DED

Třetí kategorií je Direct energy deposition (DED), která využívá dávkování prášku nebo kovového drátu přes trysku přímo na konstrukční část. K natavení materiálu dochází pomocí laserového, nebo elektronového paprsku, viz Obr. 2 c) [14]. K tavení dochází v přesný čas depozice, a na rozdíl od následující technologie Binder Jetting zde není potřeba použití pojiv. Podle použití výchozího materiálu se DED dělí na dvě podkategorie:

- **Powder DED**

U metody Powder DED tvoří základní materiál tisku prášek. Tryska umístěná zpravidla na víceosém rameni má více otvorů, kterými je do místa fúze dopravován prášek pomocí nosného plynu, dále ochranná atmosféra a zdroj tepla – např.: laser [15]. Výhodou této technologie je schopnost opravovat výrobky, které nevznikly tiskem. Bezpečnostní opatření a cena systému se pohybuje v podobném rozmezí jako u technologie PBF [12].

- **Wire DED**

U této technologie je výchozím materiálem kovový drát, který je nejčastěji taven pomocí elektronového paprsku [15]. Výhodou drátu je rychlost a velikost tvořených součástí až do velikosti cca 5 m x 1 m x 1 m. Kvalita a preciznost je však výrazně nižší než v případě použití prášku při metodě DED [12].

2.2.3.3 Technologie BJ

Celým názvem Binder Jetting (BJ) je metoda s velkou produktivitou, pomocí níž lze vyrábět větší množství kusů než u metod předešlých.

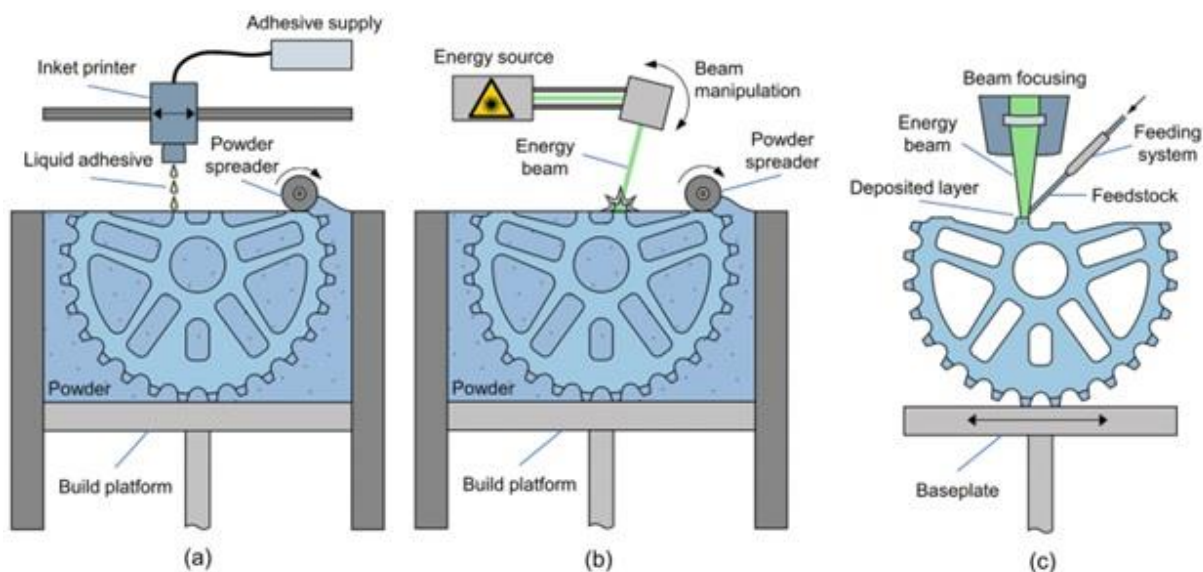
Funguje na principu sprejování tekutého pojiva na podkladovou desku, na níž je následně nanášena tenká vrstva kovového prášku, viz Obr. 2 a). Po jednom cyklu dojde k vertikálnímu pohybu podkladové desky, tak aby bylo umožněno nanášení další vrstvy materiálu. Tento proces se opakuje do vytvoření cílového tvaru polotovaru s nízkou pevností a přibližně 60% relativní hustotou. Polotovar se následně vyjme z vany, očistí od zbytkového prášku a nechá se tepelně zpracovat. Tento proces odstraní pojivo a speče částice dohromady, tím se dosáhne plné hustoty výrobku. Poslední fáze spékání může probíhat ve větších sériích, což šetří čas i náklady [12].

Velkou nevýhodou je, že při spékání dochází ke značnému objemovému smrštění výrobku. S tím je nutno předem počítat a je to jednou z hlavních nevýhod této metody [16]. Mezi výhody patří široký výběr materiálů, možnost výroby barevných modelů a rychlost tisku [17]. Právě tato technologie má velký potenciál. V budoucnu by mohla nahradit dnes nejvíce používanou technologii SLM, a to především díky rychlosti výroby. K odstranění nevýhody objemového smrštění při slinování kovového prášku byla vynalezena podobná metoda, při které je však v autoklávu při kontrolovaném tlaku a teplotě vyměněno pojivo za kov s nízkou teplotou tání – například za bronz. Výsledný výrobek je pak kompozitem složeným ze dvou různých kovových materiálů, například z nerez a bronzu [18].

2.2.3.4 Technologie BPE

Poslední skupinou je Bound Powder Extrusion. Tato technologie je velmi nová, a tak se není na Obr. 1. BPE nevyužívá sypkého kovového prášku jako plniva. Místo toho využívá směsi prášku s polymerem typu vosků jako pojiva, ze kterých je vyroben tiskový drát. Díky tomu se může tisknout stejným způsobem jako je tomu u 3D tisku plastů. Výsledkem je technologie, která je mnohem jednodušší a bezpečnější než s volným kovovým práškem. S vytištěnou součástí je možné operovat holou rukou, bez speciálních bezpečnostních opatření. Po tisku následují dvě dokončovací operace. První z nich je speciální lázeň, ve které dojde k rozpuštění polymeru. Při následné operaci dojde ke slinutí kovové konstrukce do finálního stavu [12]. Všechny tři procesy jsou uskutečnitelné v kancelářském prostředí. A to díky tomu, že stroje nevyžadují velké nároky na prostor ani bezpečnost a jsou uživatelsky velice jednoduché na

ovládání, právě těmito výhodami se výrobce *Proto 3000* u své série kovových tiskáren chlubí. Cena technologie je taktéž zanedbatelná ve srovnání s SLM nebo BJ [19].



Obr. 2: Metody 3D tisku kovů [3]

(a) Binder jetting (BJ); (b) Powder bed fusion (PBF); (c) Direct energy deposition (DED).

2.3 Hybridní aditivní konstrukce

Za hybridní výrobu je podle Thomase Feldhausena považován proces, který v sobě kloubí aditivní formu výroby a subtraktivní, resp. některou z konvenčních forem výroby, a to v jediném výrobním zařízení. Případ, kterým se zabývá bakalářská práce je kombinace těchto výrobních postupů na dvou různých strojích. Díky tomu, že součást vznikla dotištěním SLM technologií na již obrobený polotovár, a ani jeden z těchto procesů nebyl proces dokončovací, bude v práci označována jako hřídel „hybridní“. Název hybridní vychází z definice kombinace dvou nebo více diametrálně odlišných přístupů [20].

Výskyt hybridních součástí ve strojírenství není již tak ojedinělý. Ve většině případů se jedná o hybridní stroj, který kombinuje technologii konvenčního obrábění s technologií Wire nebo Powder Direct Energy Deposition (DED) [21]. Řešením, které je využito v bakalářské práci je využití technologie Powder Bed Fusion k dotištění části výrobku na předem obrobený polotovár. To je poměrně unikátním řešením, které není běžné a zdroje informací k tomuto tématu nejsou běžně přístupné.

Mezi výhody hybridních součástí patří ekonomická úspora zahrnující úsporu materiálu i času výroby. Avšak 3D tisk kovových materiálů má stále své limity a tato technologie stále patří mezi finančně náročnější. Pokud to konstrukce vyžaduje, je ekonomicky výhodnější součást vyrábět za pomoci 3D tisku, jelikož nám umožňuje jedinečnou konstrukci výrobku, kterou by jinými technologiemi nebylo možné vyrobit. Z ekonomického hlediska je pak nejvýhodnější, pokud to konstrukce dovoluje, výrobek rozdělit na část, kterou lze vyrobit klasickým obráběním a na část, kterou je nezbytné vyrobit za pomoci 3D tisku. Při tomto hybridním způsobu pak dochází k dotištění 3D části na obrobený polotovár. Tento způsob ušetří čas výroby, jelikož 3D tisk je většinou v porovnání s konvenčním obráběním pomalejší. Stejně tak dojde k úspoře finanční. Čas provozu tiskárny a práškový materiál cenově převyšují náklady na obrábění.

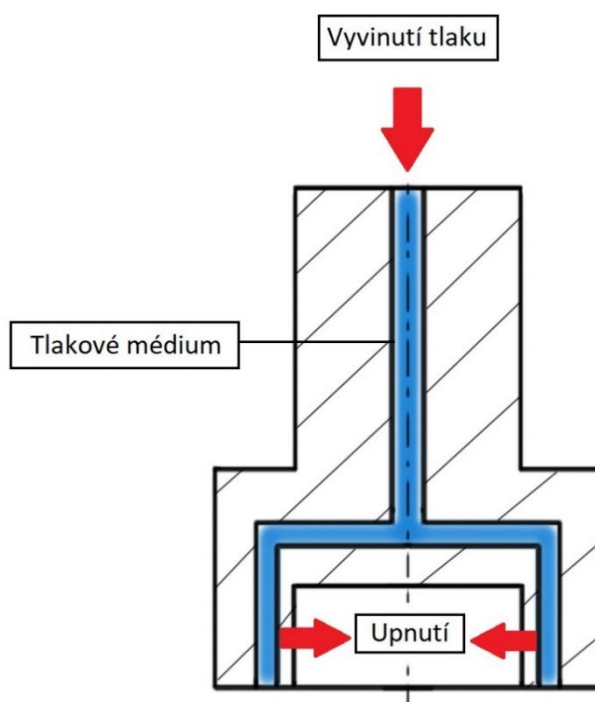
Zbytková napětí, která vznikají při aditivní výrobě se projeví u hybridních součástí, a proto je nutno celou součást upravit tepelným zpracováním.

Hlavním problémem při tomto způsobu může být upínání obrobeného polotovaru do pracovního prostoru tiskárny. Většina dílů vyžaduje vysokou přesnost upnutí a pouze některé tiskárny umožňují upnout polotovár do pracovního prostoru.

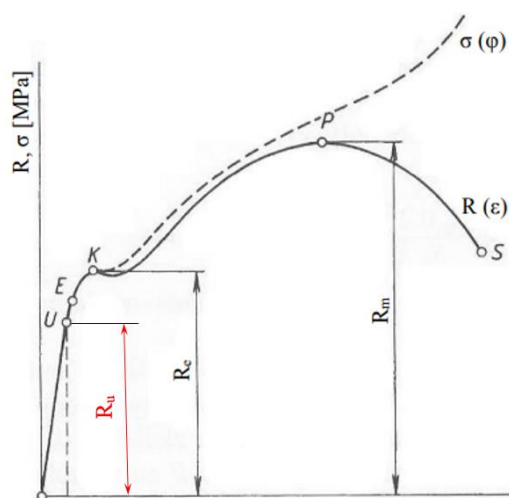
2.4 Hydraulické upínací systémy

Princip fungování hydraulického upínacího systému je založen na hypotéze, že kapalina je nestlačitelná. Pokud bude vyvíjen tlak, jak je uvedeno na Obr. 3, dojde v případě tenkých stěn vnitřní komory k elastické deformaci stěn, a to umožní upnutí součástí.

Napětí uvnitř stěny součásti nesmí překročit mez úměrnosti [R_u] materiálu, jak je vidět na diagramu tahové zkoušky oceli, viz Obr. 4. resp. deformace se může pohybovat pouze v lineární části diagramu v oblasti elastické deformace.



Obr. 3: Skica principu upínacího systému [autor]



Obr. 4: Diagram tahové zkoušky měkké nelegované oceli [26]

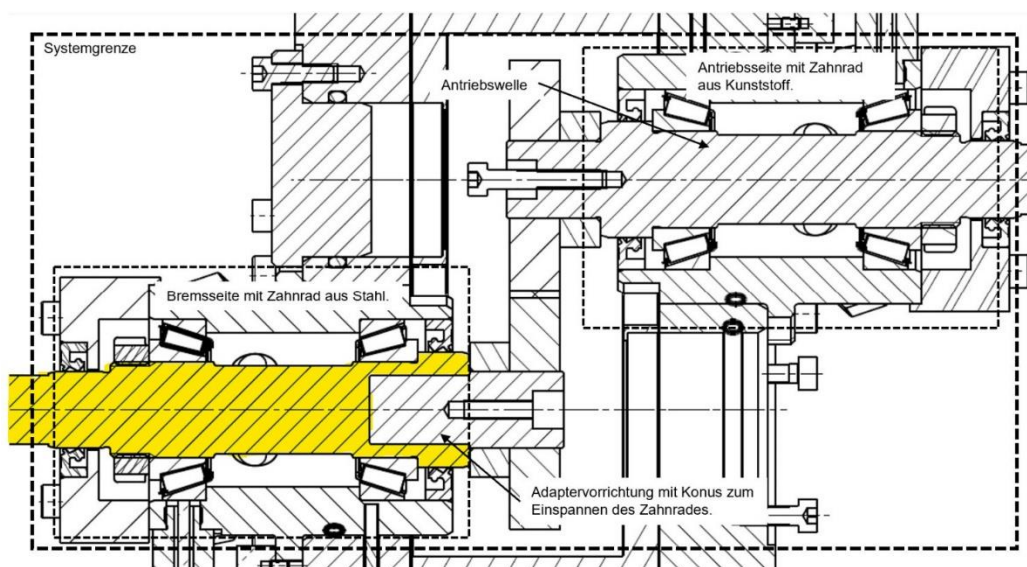
3 VÝROBA HYBRIDNÍ HŘÍDELE (řešená problematika)

3.1 Počáteční podmínky

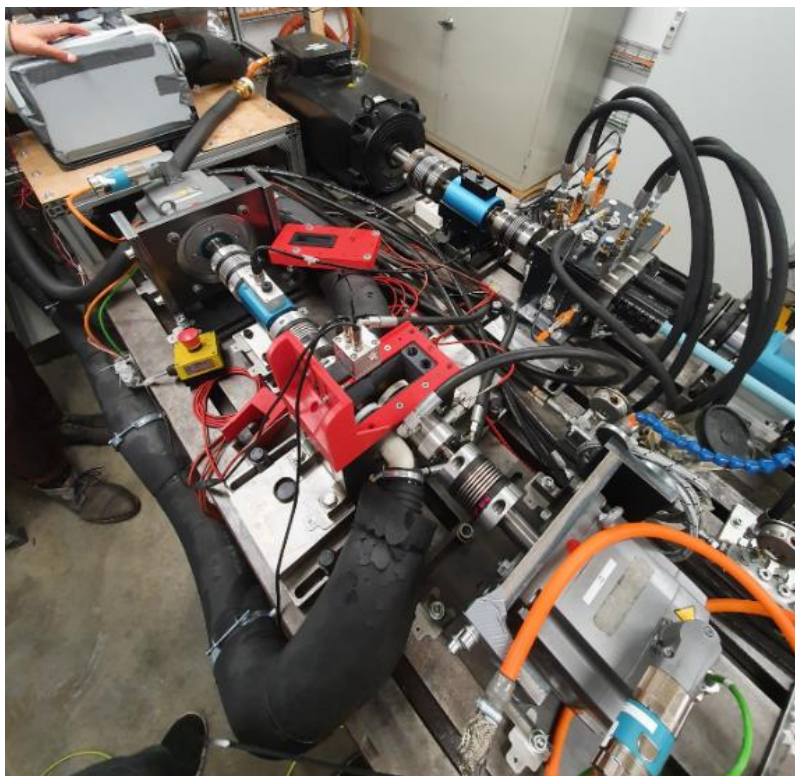
Na ZHAW School of Engineering je cílem převedení výzkumu do reálné praxe, a proto se jednou problematikou zabývá více studentů, kteří si informace sdílí a výzkumem na sebe navazují. Moje bakalářská práce navazuje na práce od studentů Jonas Fehlmann a Silvano Broggi [22], kteří se věnovali teoretickému návrhu hybridní hřídele pro zlepšení její funkčnosti.

Úkolem mé práce bylo prakticky ověřit výrobu hřídele pomocí konvenční a aditivní technologie a otestovat funkčnost řešení, a nakonec navrhnout optimalizaci výroby hřídele i postup testování a dalších technologických procesů. Vše bylo prováděno s ohledem na dostupnost technologií na ústavu. V praktické části se tedy věnuji zhotovení hřídele i s jejím testováním, kdy ověřuji slabé stránky předešlého návrhu a kontroluji parametry skutečné oproti teoreticky předpokládaným. Zvláštní pozornost věnuji technologii výroby a testování hydraulického systému s velmi jemným kanáلكovým systémem. Návrh konkrétního materiálu pro realizaci konstrukce byl konzultován se specialisty z daného odvětví v Centru pro vývoj produktů a procesů. Součástí konzultací bylo také seznámení se s konkrétním strojovým vybavením v ZPP a byly probrány varianty technických parametrů pro tepelné zpracování.

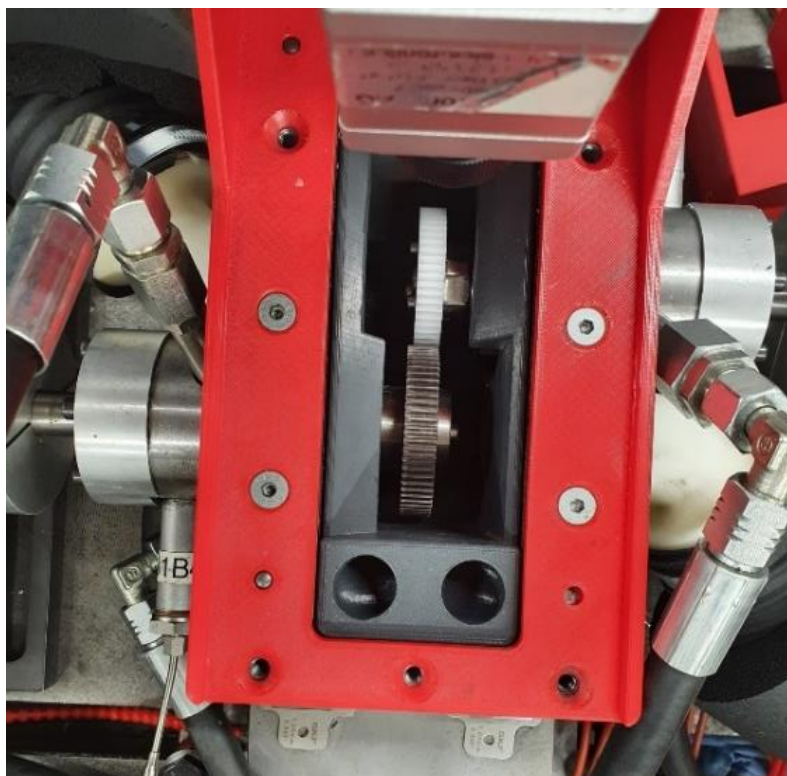
Uložení hřídele v převodové skříni je zobrazeno v řezu na Obr. 5 a vyznačeno žlutou barvou. Na Obr. 6 je vidět celé zařízení sloužící k testování ozubených kol a na Obr. 7 je detail převodové skříně, ve které je uložena aktuální hřídel.



Obr. 5: Výkres uložení hřídele v převodové skříni [22]



Obr. 6: Testovací zařízení na ozubená kola ZHAW School of Engineering [autor]



Obr. 7: Detail převodové skříně testovacího zařízení [autor]

3.2 Seznam použitých dílů

V Tab. 1 je seznam dílů nakoupených, kromě položek č. 2 a č. 4 se jedná o díly normované.

V Tab. 2 uvádím díly, které jsem vyhotovil podle předem navrženého postupu a v Tab. 3 se nacházejí díly, které jsem v rámci bakalářské práce samostatně navrhnul i vyrobil.

3.2.1 Seznam nakoupených komponent

Tab. 1: Seznam nakoupených dílů

ČÍSLO	NÁZEV POLOŽKY	ZPRACOVÁNÍ	POPIS	FOTKA	MNOŽSTVÍ [ks]
1.	ZÁTKA ODVZUŠNĚNÍ M3	normová součást			1
2.	NASTAVOVACÍ ŠROUB M5	zakázka na míru	INOX A2 M8x14		1
3.	ERIKS O- KROUŽEK NBR 70 36624	normová součást	NBR 70 60x3,5mm		1
4.	PODPŮRNÝ KROUŽEK	zakázka na míru	mosaz		1
5.	HYDRAULICKÝ OLEJ CASTROL HYSPIN		HVI 46 D Vario HDX		1,6 ml
6.	TEFLONOVÁ PÁSKA				1
7.	STŘÍKAČKA		3 ml		1
8.	HYDRAULICKÁ TRUBICE		6 x 1 mm		1





3.2.2 Seznam vyrobených dílů (podle předem navrženého postupu)

Tab. 2: Seznam vyrobených dílů (podle předem navrženého postupu)

ČÍSLO	NÁZEV POLOŽKY	ZPRACOVÁNÍ	Materiál	FOTKA	MNOŽSTVÍ [ks]
9.	HYBRIDNÍ HŘÍDEL	<ul style="list-style-type: none"> • Soustružení • Tisk (SLM) • Broušení • Tepelné zpracování 	1.6580		1
10.	PROVOZNÍ ADAPTÉR	<ul style="list-style-type: none"> • Soustružení • Vrtání 	1.4305		1

3.2.3 Seznam dílů mnou navržených a vyrobených

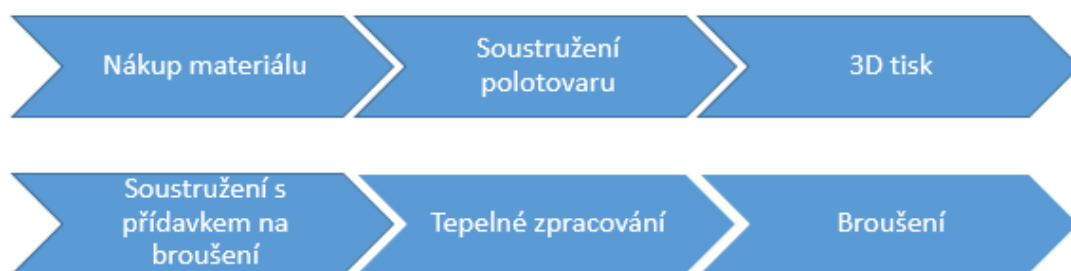
Tab. 3: Seznam dílů mnou navržených a vyrobených

ČÍSLO	NÁZEV POLOŽKY	ZPRACOVÁNÍ	Materiál	FOTKA	MNOŽSTVÍ [ks]
11.	Čepy	<ul style="list-style-type: none"> • Soustružení 	1.4305		3
12.	Testovací adaptér A1 (viz příloha C)	<ul style="list-style-type: none"> • Soustružení • Frézování 	1.4305		1
13.	Testovací adaptér A2 (viz příloha D)	<ul style="list-style-type: none"> • Soustružení • Frézování 	Slitina hliníku		1
14.	Trychtýř vyrobený 3D tiskem CraftBot Flow	<ul style="list-style-type: none"> • 3D Tisk • Tvorba závitu 	PLA polymer		1

3.3 Výroba součástí

3.3.1 Hybridní hřídel

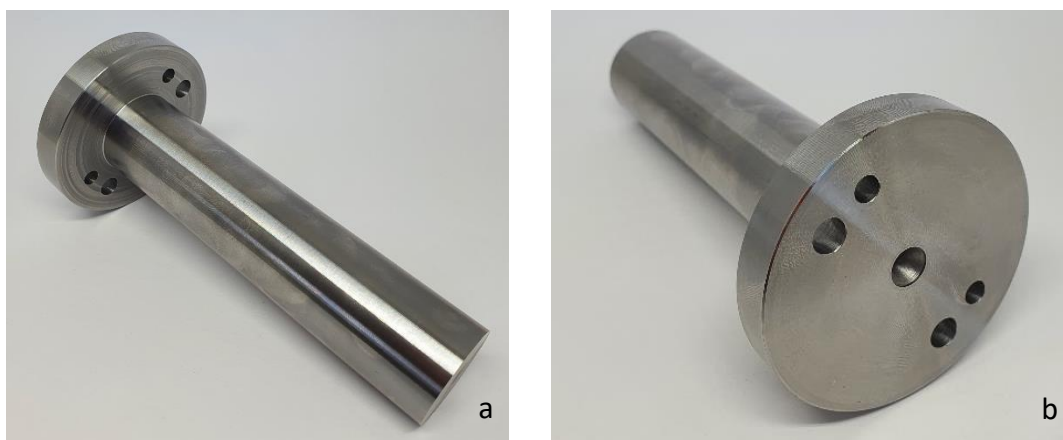
Hybridní hřídel jsem vyhotovil podle postupu a výkresu (viz příloha B) navrženého v předem zmíněné bakalářské práci [22]. Výkres návrhu postupu jednotlivých operací je znázorněn na Obr. 8. Jako první krok byla objednána ocel s číselným označením 1.6580 určená pro soustružení první části hřídele. Složení této oceli je v Tab. 4. Poté byl vysoustružen požadovaný tvar se speciálním podstavcem (viz Obr. 9 a); b)), který sloužil k přesnému upnutí části do 3D tiskárny.



Obr. 8: Sled operací při výrobě hřídele

Tab. 4: Konstrukční ocel 1.6580 [22], [23]

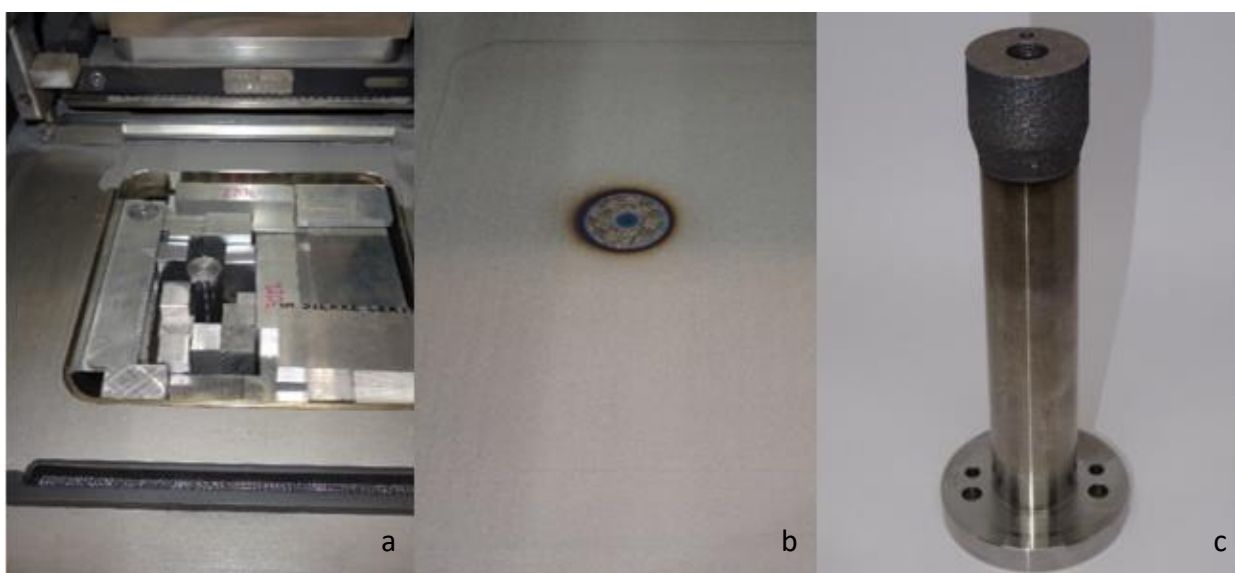
OZNAČENÍ EN	POPIS	Chemické složení [%]
<ul style="list-style-type: none">• 1.6580• 30CrNiMo8	<ul style="list-style-type: none">• Konstrukční ocel• Pevnost v tahu ≤ 1400 MPa• Tvrdost ≤ 62 HRC• Dobrá odolnost proti opotřebení	<ul style="list-style-type: none">• (C) 0.26-0.34• (Si) max. 0.4• (Mn) 0.5-0.8• (Ni) 1.8-2.2• (P) max. 0.025• (S) max. 0.035• (Cr) 1.8-2.2• (Mo) 0.3-0.5



Obr. 9: Hřídel po prvním soustružení připravená na 3D tisk [autor]

(a) Pohled I. (b) Pohled II.

K následnému 3D tisku jsem využil stroj Renishaw AM40HT. Na Obr. 10 je zobrazen 3D tisk druhé části hřídele s hydraulickým upínacím systémem. Na Obr. 10 a) je vidět upevněná součást v tiskovém prostoru tiskárny, společně se zbytkovým materiálem. Na počátku byla prázdná vana s upevněným polotovarem hřídele. Zbytek vany obsahoval výplňový materiál, aby došlo k ušetření prášku potřebného k 3D tisku. Obr. 10 b) znázorňuje zarovnaný kovový prášek k horní hraně hřídele a začátek samotného tisku. Na Obr. 10 c) je vidět natištěná část hřídele po vyjmutí z tiskárny a očištění od prášku.



Obr. 10: Tisk aditivní části hřídele [autor]

(a) pracovní vana přístroje (b) naplněná vana kovovým práškem (c) hřídel po aditivní operaci

Při tisku složitých struktur a kanálků docházelo k problému, jak dostat nevyužitý kovový prášek z těchto prostor. V tomto případě se nejlépe osvědčil stlačený vzduch. Při následné zkoušce objemu hydraulického systému pomocí oleje a stříkačky jsem ověřil, že objem kanálků je stejný jako na CAD modelu, čímž bylo potvrzeno, že čištění proběhlo úspěšně. Prášek bylo nezbytné vyčistit před procesem obrábění a tepelného zpracování, neboť by hrozilo zapečení prášku uvnitř součásti a případné ucpání velmi jemných kanálků o průměru jednoho milimetru.

Po 3D tisku jsem provedl osoustružení celé hřídele s přídávky na broušení a odstranil jsem podstavec ze spodní části hřídele. Proces soustružení je vidět na Obr. 11 a Obr. 12. Opracovaná hřídel byla odeslána do externí firmy Rheinmetall (viz Příloha A) k tepelnému zpracování, kde byla zakalena a popuštěna na 52 HRC. Protokol z tepelného zpracování je součástí příloh, viz Příloha E. Po tepelném zpracování jsem součást nechal brousit ve firmě WILLI Giger (viz Příloha A).



Obr. 11: Soustruh Emcomat-FB60 [autor]



Obr. 12: Upnutí hřídele v soustruhu [autor]

3.3.2 Čepy, adaptér, testovací adaptér (A1) a (A2)

Čepy, provozní adaptér a testovací adaptér (A1) jsem navrhl a vyhotovil z oceli s číselným označením dle DIN 1.4301 na stroji Emcomat-FB60 s řídicí jednotkou Heidenhein 640. Tyto součásti byly vyhotoveny ze stejného materiálu. Díky tomu se zamezí problémům s rozdílnou roztažností. Testovací adaptéry byly navrženy speciálně na test hřídele a jejich funkcí bylo propojení momentového klíče a adaptéru. Pro kontrolu byl také navržen druhý testovací adaptér (A2) ze slitiny hliníku. Díky tomu jsem mohl porovnat, který materiál bude vhodnější pro provozní zatížení. Hliníkový adaptér je na Obr. 13. Výkresy obou adaptérů A1 a A2 se nacházejí v příloze C a příloze D.

3.3.3 Trychtýř

Trychtýř jsem navrhl a vyhotovil na tiskárně CraftBot z PLA filamentu. V dílně v ZPP jsem pak následně vyhotovil závit pomocí závitníku M3. Trychtýř byl součástí sestavy, jejíž cílem bylo hydraulický systém odvzdušnit. Trychtýř je na Obr. 14.



Obr. 13: Testovací adaptér (A2) sloužící k otestování hliníku jako materiálu pro provozní adapter [autor]

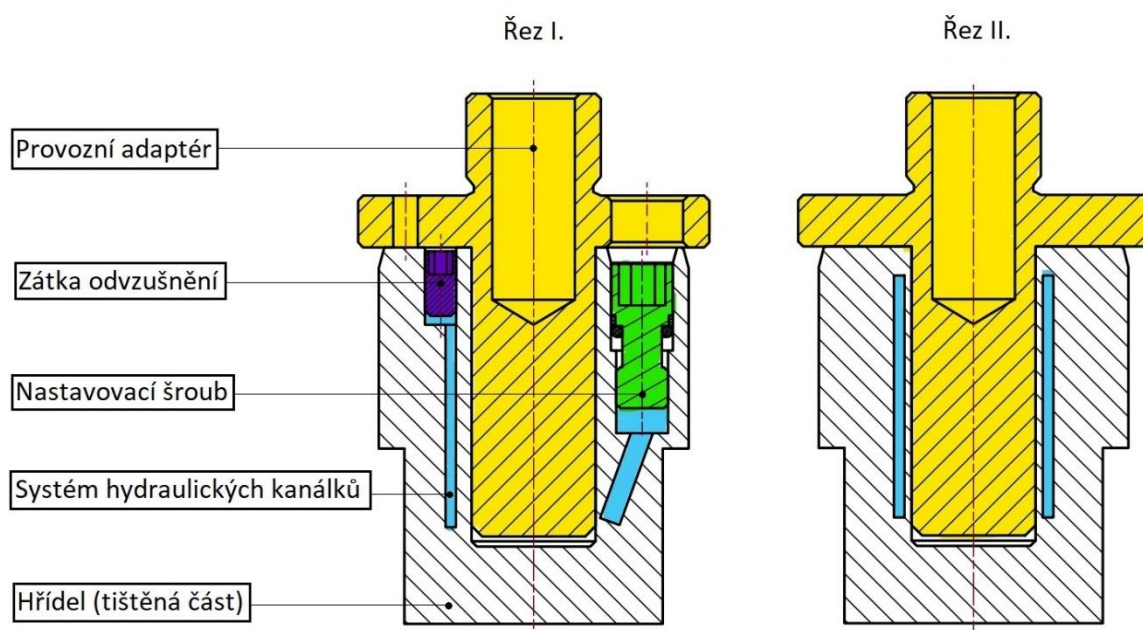


Obr. 14: Trychtýř sloužící pro naplnění systému olejem [autor]

4 TESTOVÁNÍ HYBRIDNÍ KONSTRUKCE

4.1 Sestavení systému

Po zajištění jednotlivých dílů bylo zapotřebí celý systém sestavit a správně odvzdušnit. Celá sestava upínacího systému je znázorněna ve dvou řezech na Obr. 15. Díly jsou očíslovány a popsány v seznamu dílů, viz Tab. č. 1, 2 a 3. Žlutou barvou je označen adaptér (č. 10), který slouží k upnutí jednotlivých ozubených kol v převodové skříní. Zeleně je znázorněn nastavovací šroub (č. 2), který v systému vytváří tlak a zajišťuje tak upnutí adaptéru. Na nastavovacím šroubu se nachází těsnění (č. 3) a podpůrný kroužek (č. 4). Tyto díly zajišťují utěsnění hydraulického systému. Dále je na schématu vidět zátka odvzdušnění, kterou se celý systém odvzdušňuje.



Obr. 15: Sestavení hydraulického upínacího systému [autor]

Pro ověření správného vyčištění kanálků po 3D tisku a pro dodání správného množství hydraulického oleje do systému, jsem si pomocí CAD souborů vypočítal objem kanálků, který byl 1,58 ml.

4.2 Obecné podmínky testů

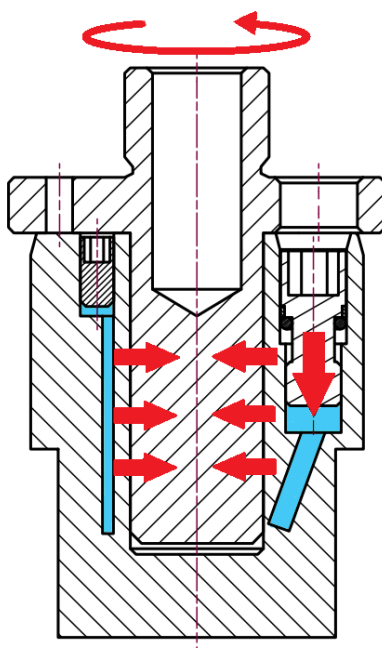
Všechna měření probíhala za laboratorní teploty 19,2 °C a běžného tlaku. Pro testování byly použity měřicí přístroje z Tab. 5: Seznam měřících zařízení.

Tab. 5: Seznam měřících zařízení

	Měřicí zařízení	Rozmezí měřených hodnot	Přesnost měření
1.	Momentový klíč STAHLWILLE	1-20 Nm	0,01 Nm
2.	Momentový klíč STAHLWILLE	20-100 Nm	0,5 Nm
3.	Mikrometr MITUTOYO	25-50 mm	0,01 mm

Jedním z cílů mé práce bylo ověřit, je-li hybridní hřídel schopna upnout dostatečnou silou provozní adaptér. V laboratoři, kde na School of Engineering testují ozubená kola, může na adaptér působit kroutící moment o hodnotách 5-20 Nm. Proto je třeba při testech použít zatížení 30 Nm, aby bylo potvrzeno, že hřídel zvládne bez problémů celý rozsah pracovních zatížení i s rezervou.

Obecné schéma testu znázorněno na Obr. 16. Nastavovací šroub vytváří tlak v hydraulickém systému a následné vychýlení vnitřního průměru zajišťuje upnutí adaptéru. Následně je měřen kroutící moment, při kterém se adaptér protočí. Dalším měřeným parametrem je u testů č. 1, 3 a 4 kroutící moment, s kterým byl utažen nastavovací šroub.



Obr. 16: Obecné schéma testování [autor]

4.3 Test 1

Cílem experimentu bylo otestovat, je-li hybridní hřídel schopna upnout dostatečnou silou provozní adaptér. Cílená hodnota zatížení je 30 Nm viz kapitola 4.2 Obecné podmínky testů.

Postup:

Schéma prvního testu je na Obr. 16. Digitálním momentovým klíčem (položka č. 1 z Tab. 5) byl dotažen nastavovací šroub kroutícím momentem 2 Nm a následně stejným klíčem, pouze za použití adaptéru (A1) (položka č. 12. z Tab. 3), byla měřena síla, při které došlo k protočení provozního adaptéru (č. 10) v hřídeli. Postupně byl nastavovací šroub dotahován a byly měřeny hodnoty kroutícího momentu, kdy docházelo k protočení provozního adaptéru.

Závěr:

U prvního testu nebylo dosaženo dostatečné síly upnutí provozního adaptéru. Maximální kroutící moment, který byla hřídel schopna přenést, byl 16,11 Nm a to v momentě, kdy byl nastavovací šroub již ve zcela zašroubovaném stavu. Požadované hodnoty zatížení 30 Nm se nepodařilo dosáhnout.

4.3.1 Optimalizace testování funkčnosti hydraulického upínání hřídele

Vlivem nedostatků řešení 1 byly stanoveny 4 hypotézy, které řeší konkrétní příčiny selhání systému.

Hypotézy nedostatků řešení 1:

- sestava nebyla dobře odvědušněna a v systému se pravděpodobně nacházely vzduchové bubliny → použít aparát na odvědušňování hydraulických brzd;
- komponenty mohly být mastné → odmastit všechny komponenty;
- adaptér měl malý koeficient tření → zhotovit druhý testovací adaptér z jiného materiálu
- vlivem tlaku se rozpínala součást i na vnějším průměru, a tak docházelo ke ztrátě upínací síly → měřit součást na vnějším průměru mikrometrem a ověřit hypotézu.

4.3.2 Optimalizovaný postup odvzdušnění

Za pomoci odvzdušňovacího aparátu došlo k zaplnění hydraulického systému olejem. Aparát se skládal z trychtýře (č. 14) hydraulické trubice (č. 8) a stříkačky (č. 7). Nejprve se trubice spojila se stříkačkou a poté byla naplněna 2 ml oleje (č. 5). Trubice a trychtýř byli připojeni k hybridní hřídeli viz Obr. 18. Dutina je vyplněna olejem a vzduchové bubliny jsou odstraněny pomocí kruhových pohybů hřídele a nakláněním v různých osách. Systém byl ponechán 1 hodinu v klidu, aby došlo k vyplavení všech vzduchových bublin. Trychtýř byl odšroubován z odvzdušňovacího kanálu a nahrazen zátkou odvzdušnění (č. 1) obalenou teflonovou páskou (č. 6). Poté jsem odstranil injekční stříkačku s hydraulickou trubicí a namontoval nastavovací šroub (č. 2), O-kroužek (č. 3) a podpůrný kroužek (č. 4). Nastavovací šroub byl utážen na hodnotu kroutícího momentu 5 Nm. Následně byl ihned opět odstraněn. Do systému byl znovu doplněn olej. Tento proces zaručoval nejlepší možné odvzdušnění kanálků. Nakonec byl seřizovací šroub znovu nainstalován. Na Obr. 17 je vidět hřídel upevněná v kleštinách frézky, kde byla umístěná pro následné testování.



Obr. 17: Upnutí hřídele v kleštině [autor]



Obr. 18: Plnění systému olejem [autor]

4.4 Test 2

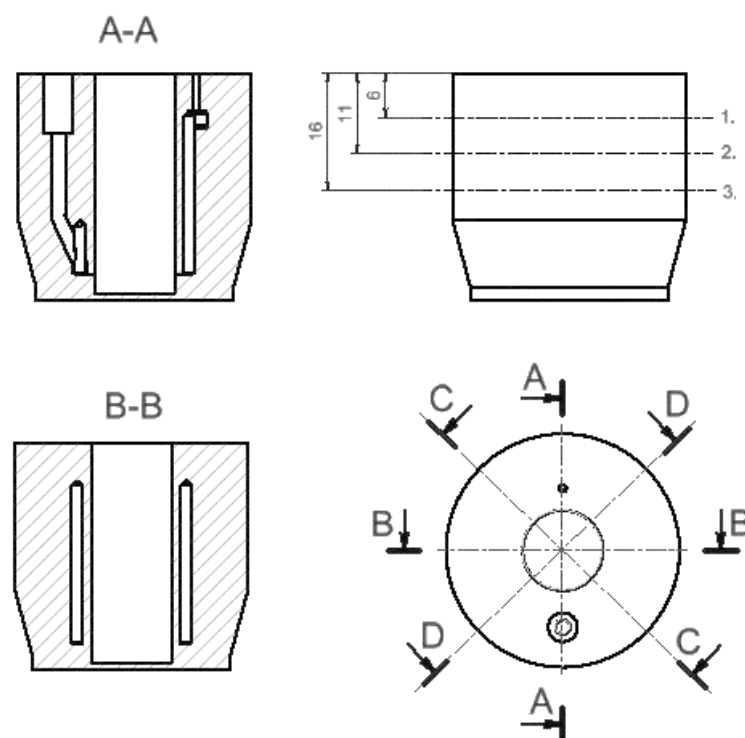
Pro nedostatky s upínáním hřídele při testu 1 jsem navrhl provést test deformace stěny upínacího zařízení, které zajišťuje přenos síly na provozní adaptér. Vlivem tlaku totiž mohlo docházet i k rozpínání součásti na vnějším průměru, čímž by docházelo ke ztrátě upínací síly.

V následujících testech proběhlo odvzdušnění hydraulického systému podle optimalizovaného postupu a zároveň byly všechny díly odmaštěny technickým benzínem.

Cílem byla dokumentace deformace hybridní hřídele během zatížení. Za účelem potvrzení či vyvrácení hypotézy, že dochází ke ztrátě intenzity upnutí, a to vlivem rozpínání součásti na vnějším průměru.

Postup:

K měření byl použit mikrometr (položka č. 3 z Tab. 5: Seznam měřicích zařízení). Vybral jsem celkem 12 bodů ve čtyřech různých řezech a třech rovinách. Obr. 19 popisuje rozložení jednotlivých bodů. Čísla 1, 2 a 3 symbolizují výšku roviny a písmeno symbolizuje řez, ve kterém bylo měření provedeno. Nastavovací šroub jsem dotáhnul kroutícím momentem 5 Nm.



Obr. 19: Rozložení jednotlivých bodů měření [autor]

Naměřené hodnoty:

V Tab. 6 je přehled naměřených hodnot průměru hřídele v jednotlivých bodech, včetně odchylek. V Tab. 7 jsou zaznamenány výsledky měření pro jednotlivé body.

Tab. 6: Naměřené hodnoty-TEST DEFORMACE

	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a ₃ [mm]	a ₄ [mm]	\bar{a} [mm]	Δa [mm]	δa [%]
1. A	30,47	30,47	30,47	30,47	30,47	0	0
2. A	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	0	0
3. A	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	0	0
1. B	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	0	0
2. B	30,48	30,49	30,48	30,49	30,49	0,005	0,01
3. B	30,49	30,48	30,48	30,49	30,49	0,005	0,01
1. C	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	0	0
2. C	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	0	0
3. C	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	0	0
1. D	30,47	30,47	30,47	30,47	30,47	0	0
2. D	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	0	0
3. D	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	0	0

Pro výpočty odchylek byly použity následující vztahy [24]:

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

$$\Delta a_1 = \bar{a} - a_1, \Delta a_2 = \bar{a} - a_2, \dots, \Delta a_n = \bar{a} - a_n \quad (1)$$

$$\Delta a = \frac{|\Delta a_1| + |\Delta a_2| + \dots + |\Delta a_n|}{n}$$

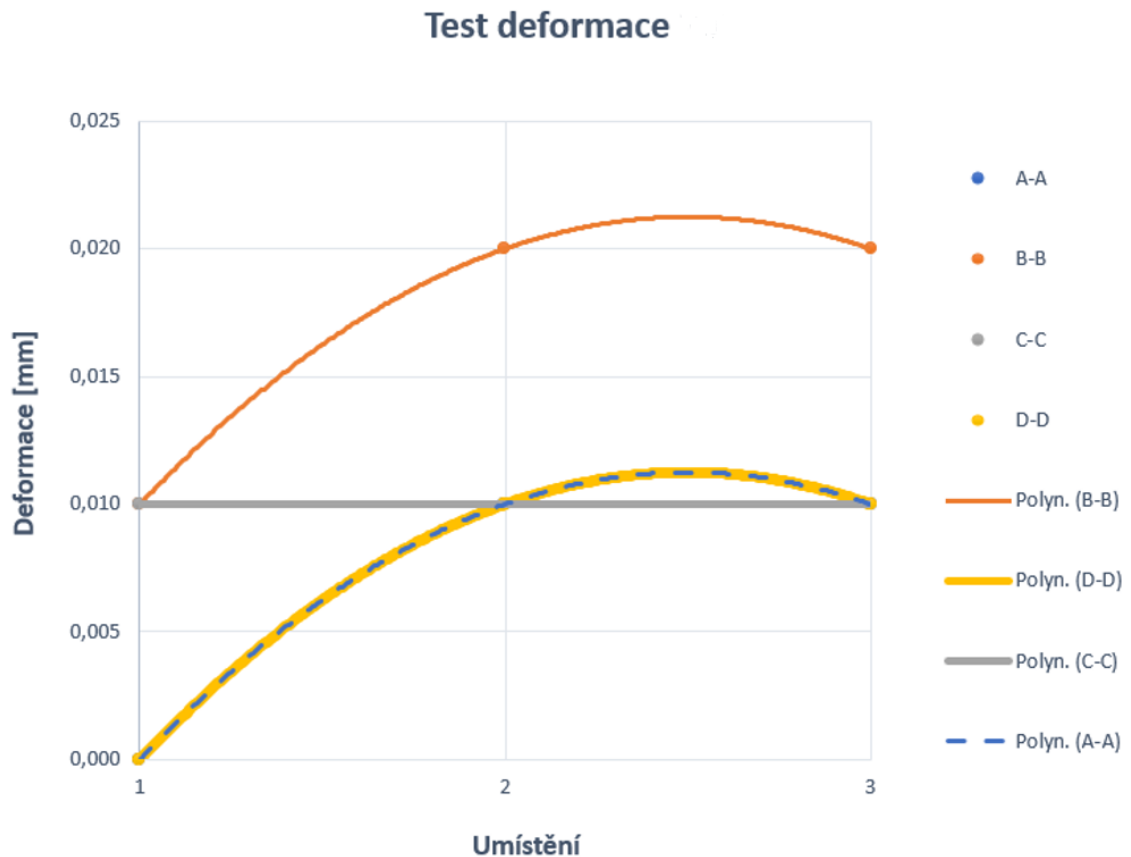
$$\delta a = \frac{\Delta a}{\bar{a}} \cdot 100\%$$

Výsledky naměřených hodnot s odchylkou:

Tab. 7: Výsledky naměřených hodnot po zpracování

1.A	2.A	3.A	1.B	2.B	3.B
30,47±0 mm	30,48±0 mm	30,48±0 mm	30,48±0 mm	30,490±0,005 mm	30,490±0,005 mm
1.C	2.C	3.C	1.D	2.D	3.D
30,48±0 mm	30,48±0 mm	30,48±0 mm	30,47±0 mm	30,48±0 mm	30,48±0 mm

Výsledky měření jsem graficky znázornil, viz Graf 1. Z něho je patrné, že deformace v řezu A a D byly totožné. Výsledky měření byly zprůměrovány a aproximací byl vypočten objem po změně vnějšího průměru hřídele. Další aproximací byl tento objem převeden na vnitřní průměr upínacího systému a pomocí následného vztahu (2) byl dopočítán přesah upnutí, kterým měl být adaptér svírán, za předpokladu, že by se změna rozměru projevila pouze na vnitřní straně upínacího systému.



Graf 1: Grafické znázornění deformace vnější strany hřídele [autor]

$$V = \pi r^2 v$$

$$V = V_1 - V_2$$

$$V = \pi v \cdot (r_1^2 - r_2^2) \tag{2}$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{\pi v r_1^2 - V}{\pi v}}$$

V = objem tělesa; v = výška tělesa; r = poloměr válce

Výpočtem bylo ověřeno, že hodnota přesahu uložení, která byla ztracena vlivem změny rozměru hřídele na vnější stranu byla přibližně 12 μm .

Závěr:

Měření bylo přesné, protože relativní odchylka pro všechny měřené hodnoty byla menší než 1 %. Kvůli asymetrickému vnitřnímu kanálu je deformace povrchu v každé sekci odlišná. Nepřesnost měření může být způsobena pronikáním nečistot mezi měřicí plochu mikrometru a hřídel nebo nedostatečným vyrovnáním měřicího zařízení ve vodorovné ose. Pro pevný spoj se u ložisek určených na průměr hřídele 12 mm používá přesah 26 μm [25]. Při porovnání těchto dvou hodnot je patrné, že změna rozměru vnějšího průměru výrazně ovlivnila sílu upnutí adaptéru.

4.5 Test 3

Cílem měření bylo testování nevhodnějšího materiálu a maziva pro provozní zatížení.

K měření jsem použil momentový klíč (pol. 1 z Tab. 5: Seznam měřicích zařízení). V prvních dvou krocích testu 3 jsem k čištění všech součástí použil čistič malých dílů. K dispozici jsem měl testovací adaptér A1 z oceli a testovací adaptér A2 z hliníku.

Postup měření:

V aktuálním testu jsem měřil vždy 2 hodnoty. První hodnota byla dotažení nastavovacího šroubu a druhá hodnota byl kroutící moment, při kterém se adaptér protočil v hřídeli. Princip byl stejný jako u testu 1, Obr. 16 zobrazuje schéma tohoto pokusu. Měření probíhalo pro dva adaptéry, z nichž byl jeden z oceli a druhý z hliníku. Dalším krokem bylo zjistit, jakým způsobem ovlivní test namazání testovaného adaptéru tukem, proto jsem měřil stejné hodnoty pro oba materiály jednou odmaštěné a jednou namazané tukem. V Tab. 8 jsou zaznamenány naměřené hodnoty pro oba materiály.

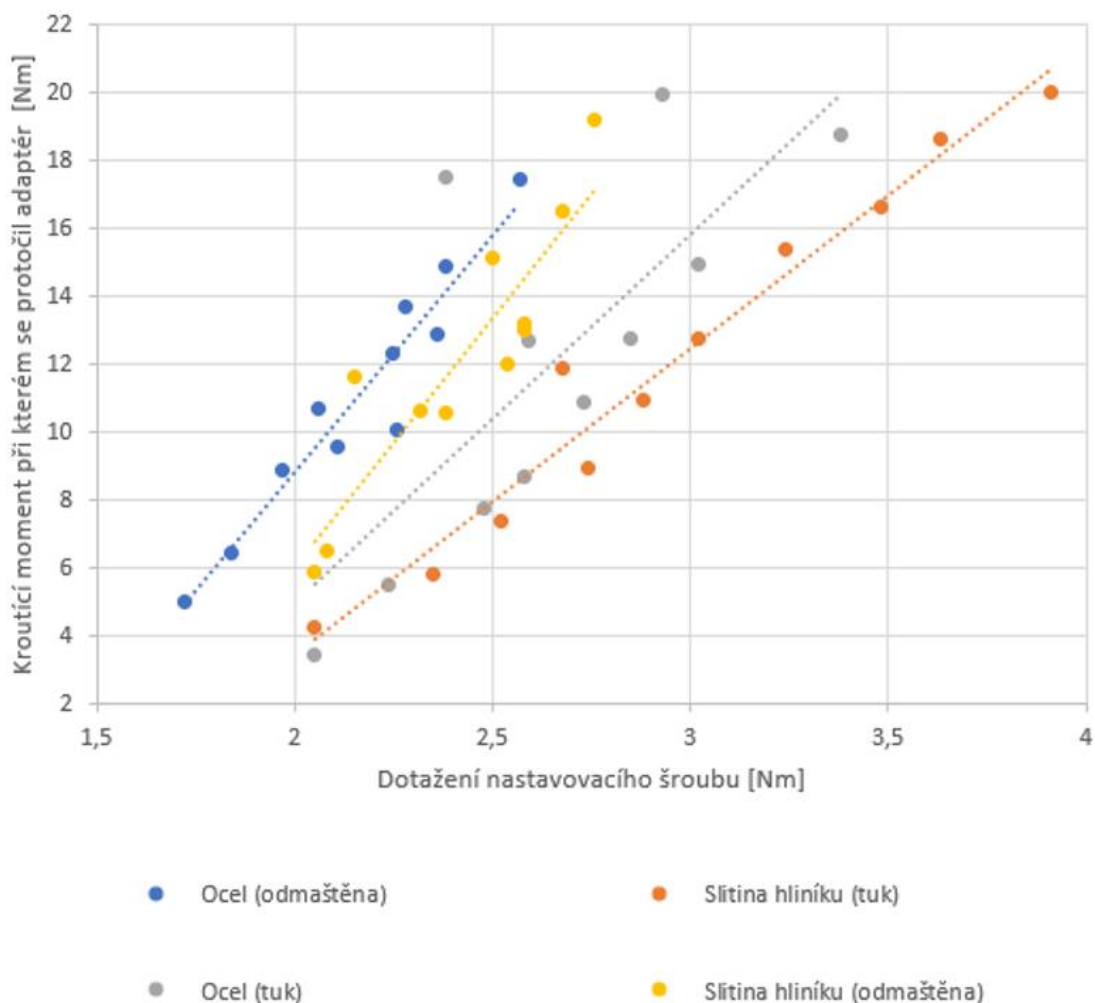
Tab. 8: Naměřené hodnoty TEST MATERIÁLŮ 2.2

	Hliník (odmaštěn) [Nm]		Ocel (odmaštěna) [Nm]		Hliník (tuk) [Nm]		Ocel (tuk) [Nm]	
1.	2,05	5,89	1,72	4,98	2,05	4,26	2,05	3,47
2.	2,58	13,20	1,84	6,42	2,35	5,81	2,24	5,49
3.	2,76	19,19	2,06	10,67	2,52	7,36	2,48	7,73
4.	2,15	11,60	2,28	13,67	2,74	8,93	2,58	8,71
5.	2,38	10,58	2,57	17,45	2,88	10,92	2,73	10,85
6.	2,54	11,97	1,97	8,90	3,02	12,77	2,85	12,74
7.	2,68	16,52	2,11	9,56	3,24	15,40	3,02	14,94
8.	2,50	15,13	2,25	12,30	3,48	16,61	3,38	18,75
9.	2,08	6,53	2,38	14,86	3,63	18,63	2,59	12,70
10.	2,32	10,65	2,36	12,85	3,91	19,97	2,93	19,95
11.	2,58	12,98	2,26	10,04	2,68	11,86	2,38	17,50

Výsledek:

Z Grafu 2 je patrné, že nejefektivnějším poměrem naměřených hodnot na zkušebním zařízení byla ocel, která byla čištěna v čističi malých dílů. Nejméně vhodný byl hliník namazaný tukem, pro který bylo nutné nastavit největší utahovací moment, aby se dosáhlo stejných hodnot.

Test materiálů



Graf 2: Porovnání naměřených hodnot z testu 3 [autor]

Závěr:

Všechny čtyři lineární interpolace jsou téměř paralelní, což ukazuje, že upnutí dosahuje stejné intenzity v rozsahu 1 až 20 Nm. Protože účelem bylo dosáhnout co největší upínací síly, byla jako nejvhodnější odmaštěná ocel bez tuku. Tento výsledek byl očekáván, jelikož koeficient tření pro dvojici hliník s ocelí je nižší než pro ocel s ocelí. Důležitým výstupem tohoto testu je fakt, že veškeré varianty materiálů a maziva by uspěly při provozním zatížení hřídele. Kroučící moment, který na adaptér při provozním zatížení působí může být až 20 Nm.

4.6 Test 4

Ve 4. testu bylo ověřováno, jaký krouticí moment je třeba použít pro dotažení nastavovacího šroubu, aby bylo dosaženo upevnění adaptéru silou 10, 20 a 30 Nm.

Test 4 využívá poznatků z testu 3, a proto je testován pouze vybraný materiál, kterým byla odmaštěná ocel. Nový test měl za cíl měřit hodnoty až do 30 Nm. K tomu bylo zapotřebí zvolit momentový klíč o větším rozsahu.

Postup:

Pro první dvě měření byl použit momentový klíč (položka č. 1 z Tab. 5: Seznam měřicích zařízení). Pro poslední měření byl použit momentový klíč (č. 2). Hodnoty byly naměřeny pro ocelový adaptér. Stejně jako test 1 a 3 funguje test 4 na stejném principu. Obr. 16 popisuje schematicky princip měření.

Jako první krok jsem dotáhnul nastavovací šroub kroutícím momentem 2 Nm a změřil jsem, jakého kroutícího momentu bylo zapotřebí pro to, aby se provozní adaptér v hřídeli protočil. Nastavovací šroub jsem postupně dotahoval a zkoumal jsem jakých hodnot kroutícího momentu bude potřeba k protočení provozního adaptéru.

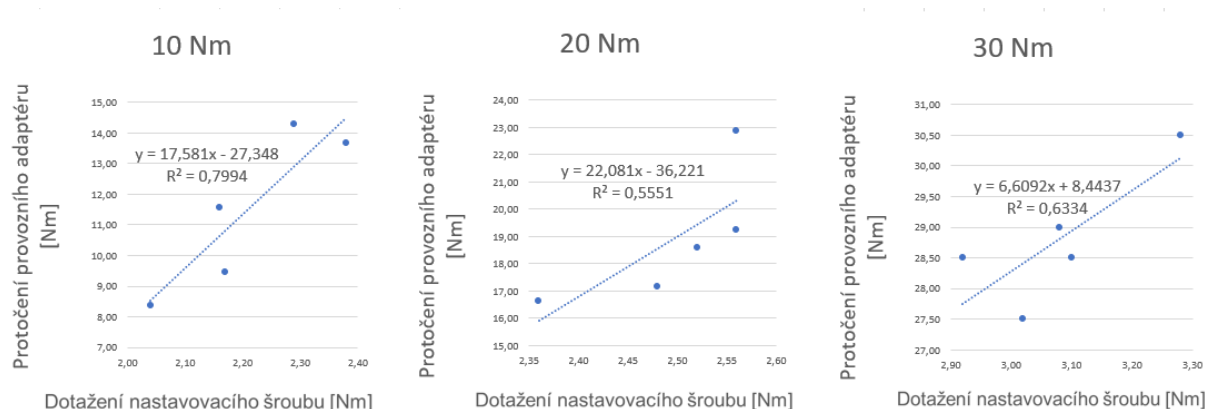
Naměřené hodnoty:

Tab. 9: Naměřené hodnoty TEST 4

Dotažení nastavovacího šroubu [Nm]	Krouticí moment, při kterém se adaptér protočil v hřídeli [Nm]	Dotažení nastavovacího šroubu [Nm]	Krouticí moment, při kterém se adaptér protočil v hřídeli [Nm]	Dotažení nastavovacího šroubu [Nm]	Krouticí moment, při kterém se adaptér protočil v hřídeli [Nm]
2,38	13,66	2,56	22,86	2,92	28,50
2,16	11,55	2,36	16,61	3,02	27,50
2,04	8,38	2,48	17,16	3,08	29,00
2,29	14,30	2,52	18,59	3,10	28,50
2,17	9,46	2,56	19,25	3,28	30,50

Pomocí vzorců z lineární regrese (viz Graf 3) jsem určil, kolika Nm je nutné utáhnout nastavovací šroub, aby bylo dosaženo upínací síly 10, 20 a 30 Nm. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 10.

Výsledky:



Graf 3: Znárodnění lineární regrese [autor]

Tab. 10: Výsledky TESTU 4

10 Nm	20 Nm	30 Nm
$y = 17,581x - 27,348$ $R^2 = 0,7994$	$y = 22,081x - 36,221$ $R^2 = 0,5551$	$y = 6,6092x + 8,4437$ $R^2 = 0,6334$
$y=10$ Nm $x=2,12$ Nm	$y=20$ Nm $x=2,55$ Nm	$y=30$ Nm $x=3,26$
2,12 Nm	2,55 Nm	3,26 Nm

Závěr:

Pomocí vzorce z lineární regrese jsem vypočítal hodnotu, se kterou musí být nastavovací šroub utažen, aby hřídel vydržela konkrétní zatížení. Výsledky měření však byly velice nepřesné, což bylo prokázáno tím, že při vyšší síle dotažení nastavovacího šroubu byla naměřena nižší hodnota při protočení adaptéru a obráceně. Nepřesnost výsledků mohla být způsobena nepřesností měřidla nebo tím, že síla, kterou bylo zařízení zatěžováno nebyla lineární a výkyvy při zatížení lidskou silou se mohli promítnout do výsledků. Pro praktické použití hřídele v provozu však stačí důkaz, že utažení šroubu na 3,2 Nm stačí k pokrytí všech pracovních zatížení zařízení.

5 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V průběhu bakalářské práce byla sestrojena a otestována hybridní hřídel, jejímž účelem je zjednodušit a urychlit výměnu ozubených kol v testovacím zařízení. Je proto nezbytné, aby hybridní hřídel byla schopna upnout dostatečnou silou provozní adaptér. Pro ověření funkčnosti a navržení změn jsem navrhnul technologický postup zahrnující několik testů. Tyto testy potvrdily, že tlaková síla v hydraulickém systému, která měla zajišťovat upnutí adaptéru v hřídeli, se spotřebovává i na zvětšení vnějšího průměru hřídele. Z tohoto důvodu spolu s vlivem špatného odvzdušnění nebylo pravděpodobně v prvním testu dosaženo dostatečné síly k upnutí adaptéru. Vzhledem k poměru tloušťky stěny na obou stranách od vnitřního hydraulického kanálku, je tento výsledek poměrně nečekaný, neboť na vnitřní straně byla tloušťka stěny 0,75 mm a na vnější straně cca 7 mm.

Ačkoliv z důvodu zjednodušení tvaru na vetknutý válec nebyla aproximace výsledků zvětšení průměru hřídele na vnější straně na hodnotu přesahu na vnitřní straně zcela přesná, v porovnání s převzatou hodnotou přesahu pro pevný spoj 26 μm tvoří poměrně velmi výraznou část.

Při dalších testech byl hodnocen koeficient tření mezi jednotlivými materiály. Nejvyšší adheze bylo dosaženo dle předpokladů u odmaštěné oceli, avšak při správně odvzdušněném systému byla schopna přenosu požadovaného kroutícího momentu i tukem namaštěná ocel nebo slitina hliníku.

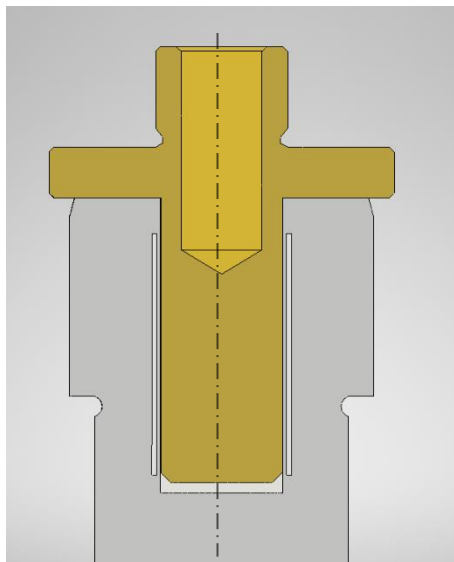
Použitá velmi jednoduchá metoda výpočtu potřebného utahovacího momentu nastavovacího šroubu pomocí lineární regrese se osvědčila jako dostatečná pro získání výsledného momentu, který pokrývá všechna pracovní zatížení.

Sestavení celého systému hybridní hřídele spolu s jejím testováním prokázalo funkčnost konstrukce a celého technologického řešení, avšak při dodržení určitých podmínek a úprav. Hlavním problémem se kterým jsem se potýkal patřil opakovaný únik hydraulického oleje skrz zátku odvzdušnění a deformace těsnění. Proto bych navrhoval před zavedením do praxe několik následujících úprav, které by pozitivně ovlivnily fungování součásti v provozu.

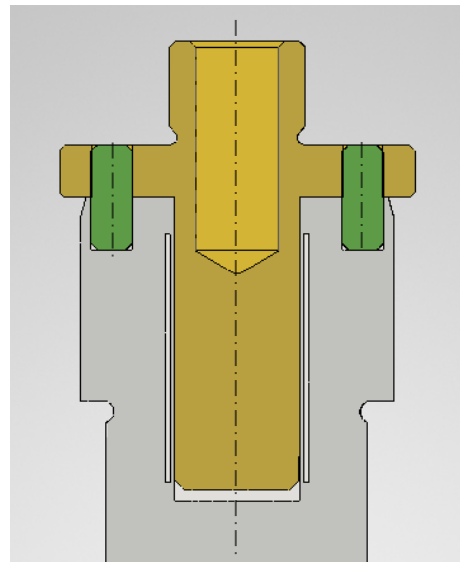
5.1 Návrh změny konstrukčního řešení

5.1.1 Přidání zajišťovacích čepů

První z vylepšení, které bych zvažil před zavedením součásti do provozu by byla instalace pojistných čepů, které by tvořily spoj mezi hřídelí a adaptérem. V případě, že by došlo k protočení adaptéru v hřídeli, stává se nastavovací šroub nedostupný a bez povolení tlaku v systému pomocí tohoto šroubu, dojde k zabránění vysunutí adaptéru. Čepy by bránily pootočení adaptéru vůči hřídeli a zajistily by vždy správnou orientaci nastavovacího šroubu a otvoru v adaptéru, kterým je tato součást přístupná. Jejich primární funkce by nebyla přenos kroutícího momentu. Sloužily by pouze jako pojistka v případě selhání systému. Porovnání situace bez čepů a s čepy je uvedena na Obr. 21 a Obr. 20.



Obr. 20: Původní návrh bez pojistných čepů [autor]



Obr. 21: Návrh s pojistnými čepy [autor]

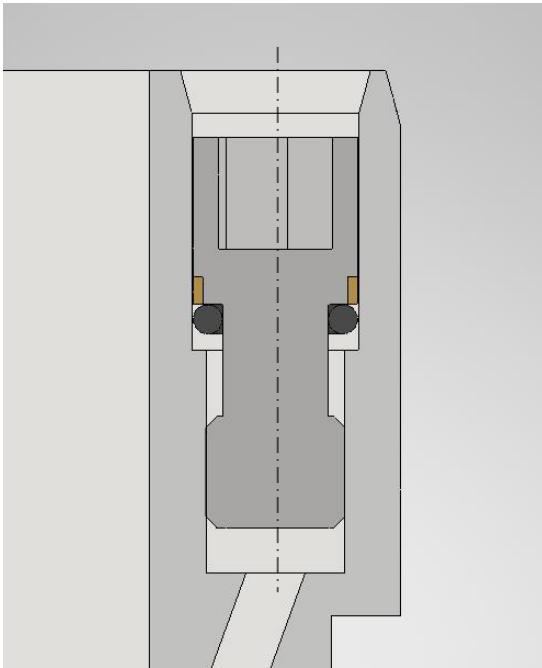
5.1.2 Výměna hydraulického média

Navrhuji použití oleje s vyšší viskozitou, popřípadě roztaveného tuku jako hydraulické kapaliny. Původně navržená zátka odvodu vzduchu M3 špatně těsnila, a ačkoliv po přidání teflonové pásky došlo ke zlepšení utěsnění, v některých případech stále docházelo k úniku. Proto navrhuji použití oleje s vyšší viskozitou, než je Castrol Hyspin HVI 46 D Vario HDX. Je nutné, aby součást dokázala dlouhodobě vydržet pracovní zatížení bez případných úniků hydraulické kapaliny.

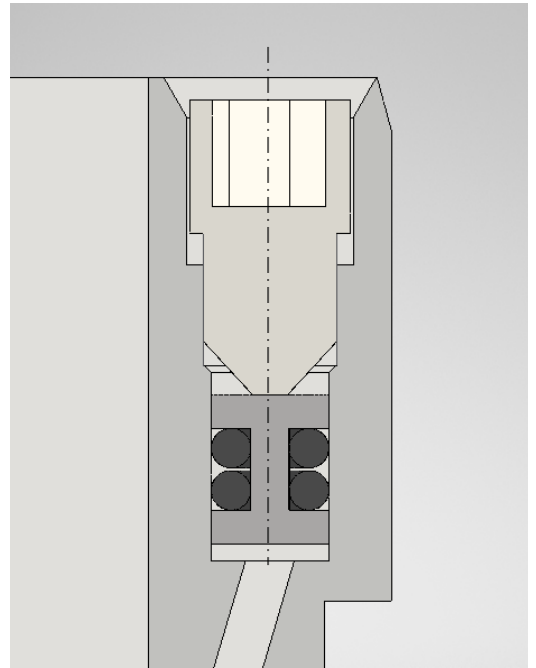
5.1.3 Navržení lepšího řešení šroubu a těsnění

Současná varianta řešení není vhodná pro opakované pracovní zatížení. Vlivem velkého tlaku v systému docházelo v průběhu testování k poškození na komponentech u nastavovacího šroubu. Největší známky poškození byly znatelné na těsnění, u kterého vlivem kontaktu se závitem při instalaci a při manipulaci s nastavovacím šroubem docházelo k vyvlékání těsnění a jeho opakované deformaci. Stejně tak byly patrné známky používání na šroubu samotném a na podpůrném kroužku z mosazi, a to ihned po první instalaci. Proto v této oblasti navrhuji následující změny.

Obr. 22 zobrazuje původní řešení, Obr. 23 zobrazuje navrženou změnu. Navrhuji samostatné řešení pro těsnění a nastavovací šroub zvlášť. To by mělo zabránit možnému poškození těsnění o závit. Došlo by tak ke zjednodušení instalace a zvýšení odolnosti celého systému.



Obr. 22: Původní řešení těsnění [autor]



Obr. 23: Nové řešení těsnění [autor]

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo ověření možnosti použití aditivní technologie 3D tisku kovu pro výrobu hybridní hřídele pro testovací zařízení na ozubená kola a ověření funkčnosti hydraulického upínání.

Tyto cíle byly splněny následujícím způsobem.

V první části bakalářské práce byla zpracována teoretická východiska z dostupných domácích i zahraničních zdrojů. Hybridní hřídel i celý upínací systém se podařilo ve vymezeném časovém období na dostupných strojích vyrobít a kombinace konvenčního obrábění a SLM 3D tisku se ukázala jako vhodná varianta. Následně se podařilo systém úspěšně sestavit a odladit funkční vady systému.

Následné testování proběhlo ve třech fázích. První test měl za úkol zjistit, zdali je systém schopný upínání při zatížení kroutícím momentem až 30 Nm. Cíleného zatížení se nepodařilo dosáhnout, ale bylo vytvořeno několik hypotéz, které byly následně potvrzeny v dalším testování. Jednou z příčin bylo nedostatečné odvzdušnění celého systému a změna vnějšího rozměru hřídele.

Další testování potvrdilo ztrátu upínací síly vlivem změny vnějšího rozměru hřídele. Naměřená odchylka od původního rozměru se pohybovala v hodnotách do 0,02 mm. Dalším testem se podařilo zjistit, jaký materiál a mazivo bude nejvhodnější do provozních podmínek. Odmaštěná konstrukční ocel se ukázala jako optimální volba. Poslední test ověřil, že po optimalizaci systému je upínací systém schopen dosáhnout provozního zatížení a jednorázově udržet kroutící moment až 30 Nm.

Montáž a testování odhalily četné nedostatky, které by při dlouhodobém užívání výrazně ovlivnily fungování systému nebo by dokonce zapříčinily poruchu součástí. Proto jsem v rámci bakalářské práce navrhnul konstrukční změny hydraulického upínacího systému, ke kterým patří zavedení pojistných čepů, výměna hydraulického média nebo konstrukční řešení nastavovacího šroubu. Tyto změny by mohly vést k úspěšnému řešení.

Výsledky práce přináší základ pro pokračování při dalším vývoji součásti a zavedení součásti do praxe.

REFERENCE

- [1] KIRCHHEIM, Andreas. *Additive Fertigungsverfahren: Přednáška AFV-Industrie Anwendungen*. Winterthur, ZHAW School of Engineering, ZPP, 2020.
- [2] AHMED, Naveed. Direct metal fabrication in rapid prototyping: A review. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, **42**, 167-191 [cit. 2021-07-15]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2019.05.001
- [3] PRAGANA, J.P.M., R.F.V. SAMPAIO, I.M.F. BRAGANÇA, C.M.A. SILVA a P.A.F. MARTINS. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* [online]. 2021, **2** [cit. 2021-07-15]. ISSN 26669129. Dostupné z: doi:10.1016/j.aime.2021.100032
- [4] SACHS, E.M., J.S. HAGGERTY, M.J. CIMA a P.A. WILLIAMS. *Three-dimensional printing techniques*. 1989. Spojené státy Americké. US5204055A. Uděleno 20.4.1993. Zapsáno 12.8.1989.
- [5] SHELLABEAR, M. a O. NYRHILAE. *DMLS - DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART* [online]. , 393-404 [cit. 2021-07-16].
- [6] DECKARD, Carl R. *Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering*. 1986. Spojené státy americké. US4863538A. Uděleno 5.9.1989. Zapsáno 17.10.1986.
- [7] LARSON, R. *Method and Device for Producing Three-Dimensional Bodies*. 1994. Spojené státy americké. US5786562A. Uděleno 28.7.1998. Zapsáno 11.5.1994.
- [8] VAVERKA, Ondřej. *Ultra lehké komponenty vyráběné 3D tiskem: Trendy* [online]. Brno, (190422), 60 [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/ultra-lehke-komponenty-vyrabene-3d-tiskem.html>
- [9] GADAGI, Basavraj a Ramesh LEKURWALE. A review on advances in 3D metal printing: Lecture Notes from the 2nd ERCOFTAC Summerschool held in Stockholm, 10-16 June, 1998. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **45**, 277-283 [cit. 2021-07-16]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.10.436

- [10] BHAVAR, V., P. KATTIRE, V. PATIL, S. KHOT, K. GUJAR a R. SINGH. *A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing*. 4th International conference and exhibition on Additive Manufacturing Technologies-AM-2014. 1-2, 2014.
- [11] About Additive Manufacturing: Powder Bed Fusion. *Loughborough University* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>
- [12] Types of 3D Printing in Metal. *Markforged: Resources* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal?fbclid=IwAR0Z92g4GVp4sz3vJ8nE0LkuRyvHziuR3_rJUs7claNR4j7SB1ygzOWJ0BY
- [13] CHUA, Chee, Kah LEONG a Chu LIM. *Rapid Prototyping: Principles And Applications*. Třetí vydání. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2010. ISBN 9789814365390.
- [14] SABOORI, Abdollah, Donato GALLO, Sara BIAMINO, Paolo FINO a Mariangela LOMBARDI. An Overview of Additive Manufacturing of Titanium Components by Directed Energy Deposition: Microstructure and Mechanical Properties. *Applied Sciences* [online]. 2017, 7(9) [cit. 2021-07-16]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app7090883
- [15] GOKULDOSS, Prashanth, Sri KOLLA, Jürgen ECKERT, S. HUANG a Wai YEONG. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials* [online]. Elsevier, 2017, 10(6), 17-40 [cit. 2021-07-16]. ISBN 9780081026632. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10060672
- [16] ZIAEE, Mohsen a Nathan CRANE. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, 28, 781-801 [cit. 2021-07-16]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.05.031
- [17] Přehled technologií 3D tisku. *Dk metal* [online]. 2018 [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [18] RICHARDOT, Amandine. 6 tips on 3D printing metal with ExOne's Binder Jetting: Avoiding shrinkage in your 3D printed part. *SCULPTEO* [online]. 2017 [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/09/12/6-tips-on-3d-printing-metal-with-exone/>

- [19] Desktop Metal Studio 3D Printer: STUDIO SYSTEM 2. *Proto3000* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://proto3000.com/product/desktop-metal-studio-3d-printer-2-2/>
- [20] *Cambridge Dictionary: hybrid* [online]. In: . [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/hybrid>
- [21] LORENZ, K., J.B. JONES, D. WIMPENNY a M.R. JACKSON. *A REVIEW OF HYBRID MANUFACTURING* [online]. Hybrid Manufacturing Technologies, 2000 North Central Expressway, Ste. 200, Plano, Dallas, Texas, USA, 2015 [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-8-Lorenz.pdf>
- [22] FEHLMANN, Jonas a Silvano BROGGI. *Auslegung und Realisierung eines hydraulischen Pressverbandes: Bericht Maschinentechnik*. Winterthur, 2020. Bachelorarbeit. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW). Vedoucí práce Dr. Hans-Jörg Dennig.
- [23] Steelnumber: 30CrNiMo8. *SteelNumber* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: http://steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=337
- [24] KOŽÍŠEK, Jan a Barbora STIEBEROVÁ. *Statistická a rozhodovací analýza*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05509-0.
- [25] SKF Valivá ložiska: Tolerance a výsledná uložení. *Skf* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000_1-CS_tcm_54-121486.pdf
- [26] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [27] In: *EOS* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing-blog>
- [28] PRAGANA, J.P.M., R.F.V. SAMPAIO, I.M.F. BRAGANÇA, C.M.A. SILVA a P.A.F. MARTINS. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* [online]. 2021, **2** [cit. 2021-03-15]. ISSN 26669129. Dostupné z: [doi:10.1016/j.aime.2021.100032](https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100032)

Seznam obrázků

Obr. 1: Rozdělení aditivních technologií [27]	13
Obr. 2: Metody 3D tisku kovů [3]	19
Obr. 3: Skica principu upínacího systému [autor]	21
Obr. 4: Diagram tahové zkoušky měkké nelegované oceli [26]	21
Obr. 5: Výkres uložení hřídele v převodové skříni [22]	22
Obr. 6: Testovací zařízení na ozubená kola ZHAW School of Engineering [autor]	23
Obr. 7: Detail převodové skříně testovacího zařízení [autor]	23
Obr. 8: Sled operací při výrobě hřídele	26
Obr. 9: Hřídel po prvním soustružení připravená na 3D tisk [autor]	26
Obr. 10: Tisk aditivní části hřídele [autor]	27
Obr. 11: Soustruh Emcomat-FB60 [autor]	28
Obr. 12: Upnutí hřídele v soustruhu [autor]	28
Obr. 13: Testovací adaptér (A2) sloužící k otestování hliníku jako materiálu pro provozní adapter [autor]	29
Obr. 14: Trychtýř sloužící pro naplnění systému olejem [autor]	29
Obr. 15: Sestavení hydraulického upínacího systému [autor]	30
Obr. 16: Obecné schéma testování [autor]	31
Obr. 17: Upnutí hřídele v kleštině [autor]	33
Obr. 18: Plnění systému olejem [autor]	33
Obr. 19: Rozložení jednotlivých bodů měření [autor]	34
Obr. 20: Původní návrh bez pojistných čepů [autor]	43
Obr. 21: Návrh s pojistnými čepy [autor]	43
Obr. 22: Původní řešení těsnění [autor]	44
Obr. 23: Nové řešení těsnění [autor]	44

Seznam tabulek

Tab. 1: Seznam nakoupených dílů	24
Tab. 2: Seznam vyrobených dílů (podle předem navrženého postupu)	25
Tab. 3: Seznam dílů mnou navržených a vyrobených	25
Tab. 4: Konstrukční ocel 1.6580 [22], [23].....	26
Tab. 5: Seznam měřicích zařízení.....	31
Tab. 6: Naměřené hodnoty-TEST DEFORMACE.....	35
Tab. 7: Výsledky naměřených hodnot po zpracování.....	35
Tab. 8: Naměřené hodnoty TEST MATERIÁLŮ 2.2.....	38
Tab. 9: Naměřené hodnoty TEST 4	40
Tab. 10: Výsledky TESTU 4	41

Seznam grafů

Graf 1: Grafické znázornění deformace vnější strany hřídele [autor]	36
Graf 2: Porovnání naměřených hodnot z testu 3 [autor]	39
Graf 3: Znázornění lineární regrese [autor].....	41

PŘÍLOHY

Seznam příloh

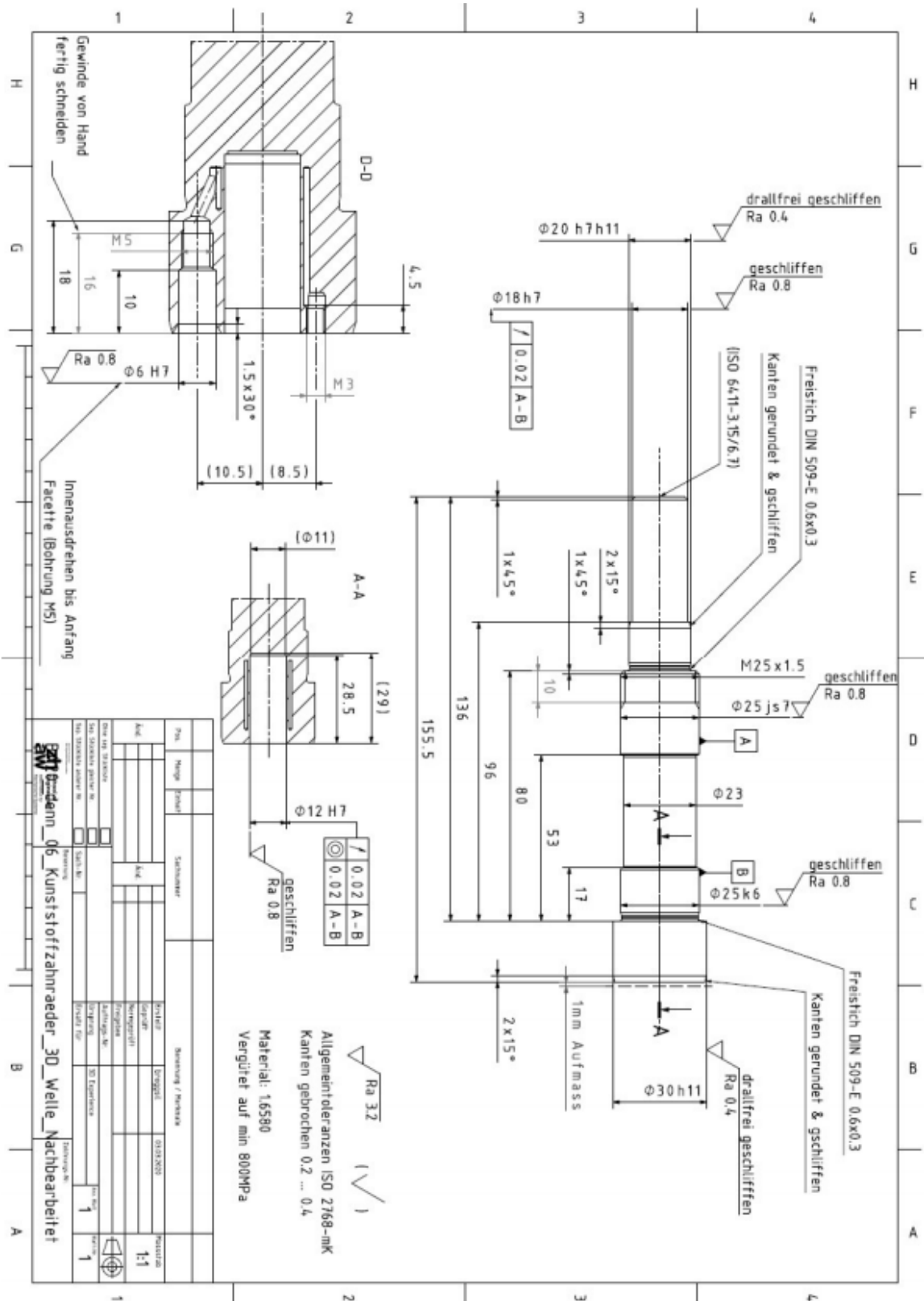
Příloha A: Seznam externích firem	53
Příloha B: Výkres hybridní hřídele [22].....	54
Příloha C: Výkres testovacího adaptéru A1 [autor].....	55
Příloha D: Výkres testovacího adaptéru A2 [autor]	56
Příloha E: Tepelné zpracování RHEINMETALL AG [autor]	57

Seznam externích firem

Rheinmetall Air Defence AG	https://www.rheinmetall.com Birchstrasse 155 8050 Zürich Schweiz Tel. +41 44 316-2211
Willi Giger AG	http://www.willigigerag.ch Landigstrasse 4 8856 Tuggen Schweiz Tel. 055 465 61 20

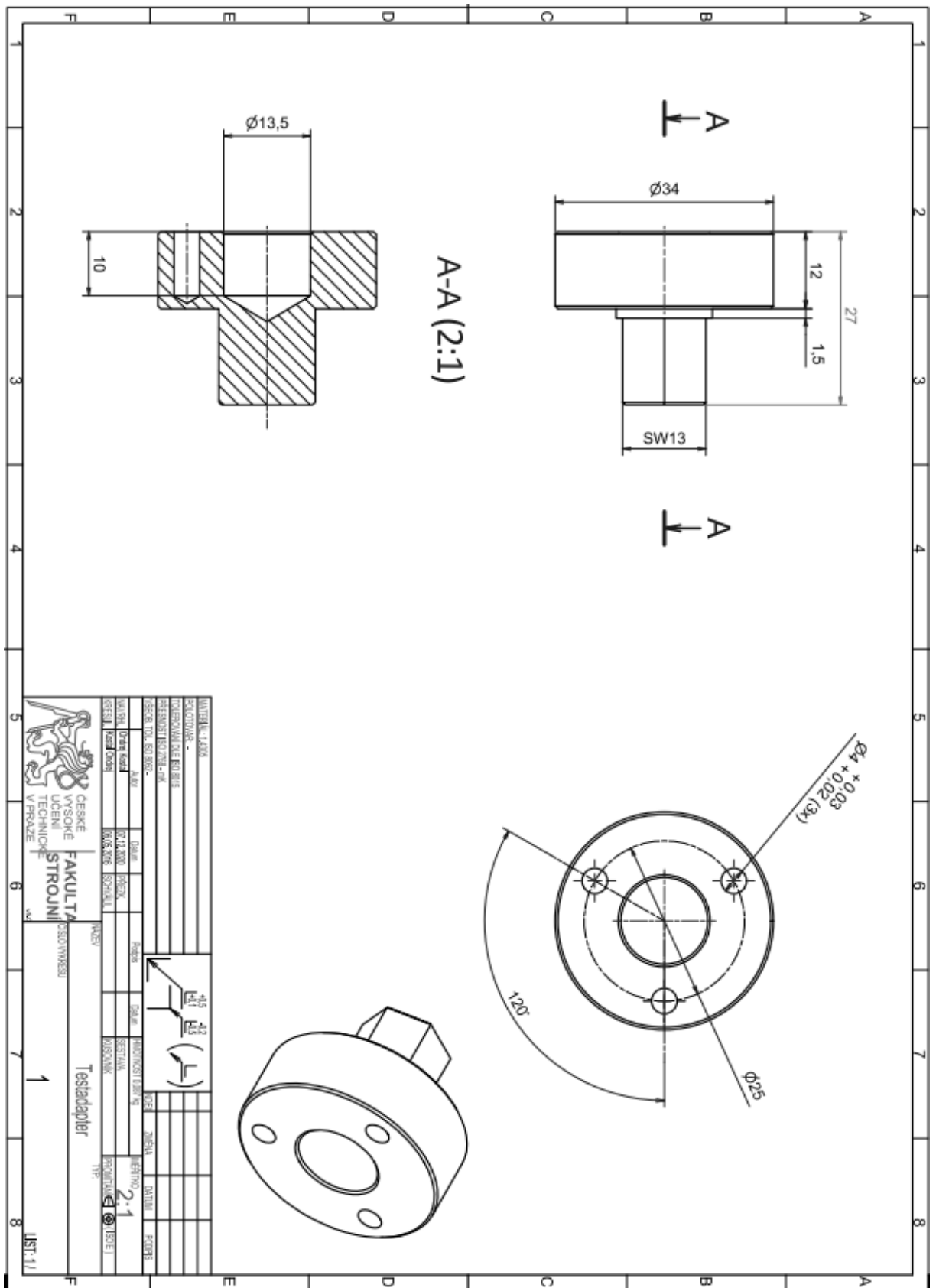
Příloha A: Seznam externích firem

Hybridní hřídel



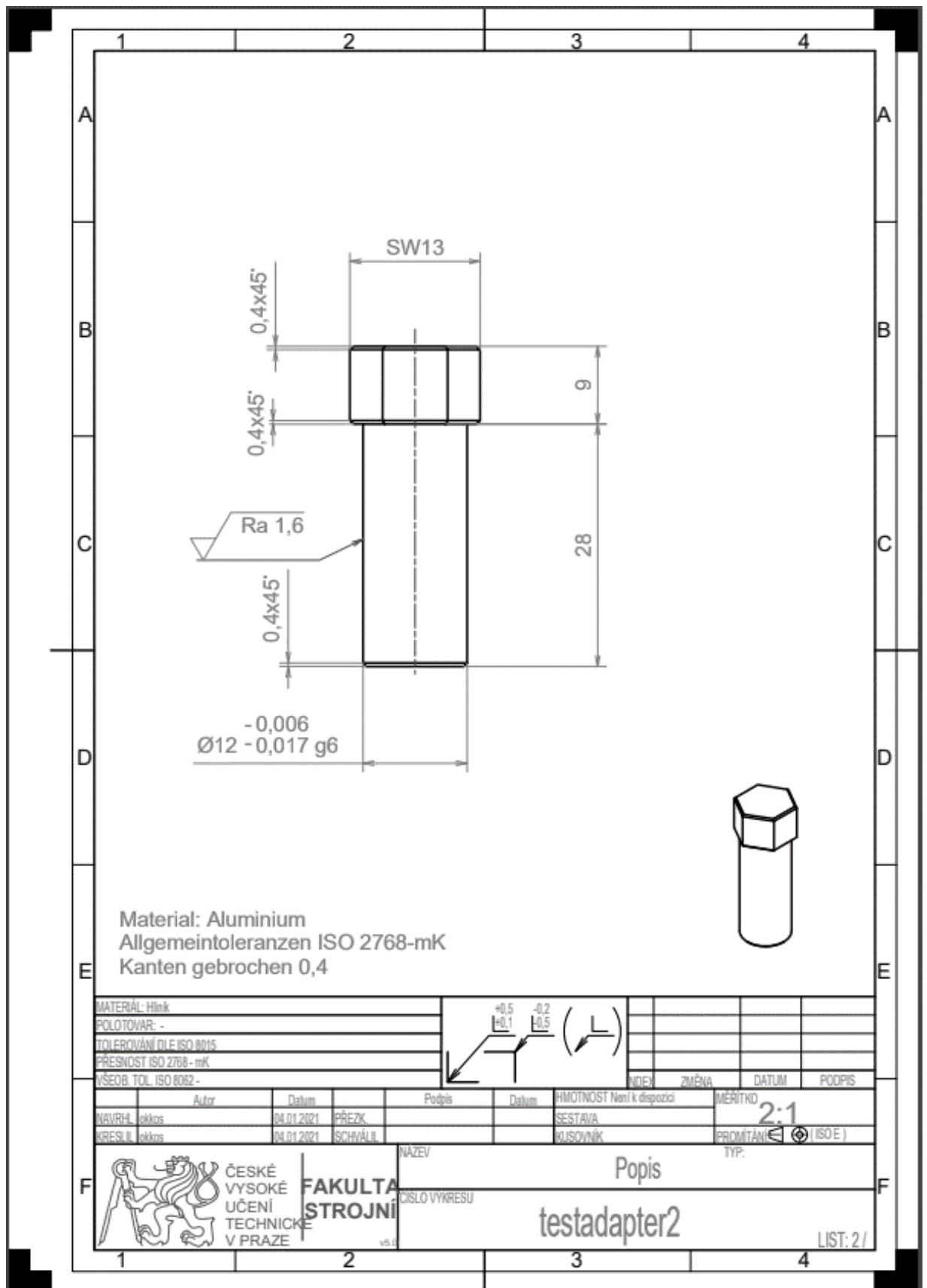
Příloha B: Výkres hybridní hřídele [22]

Testovací adaptér (1)



Příloha C: Výkres testovacího adaptéru A1 [autor]

Testovací adaptér (2)



Příloha D: Výkres testovacího adaptéru A2 [autor]

Tepelné zpracování



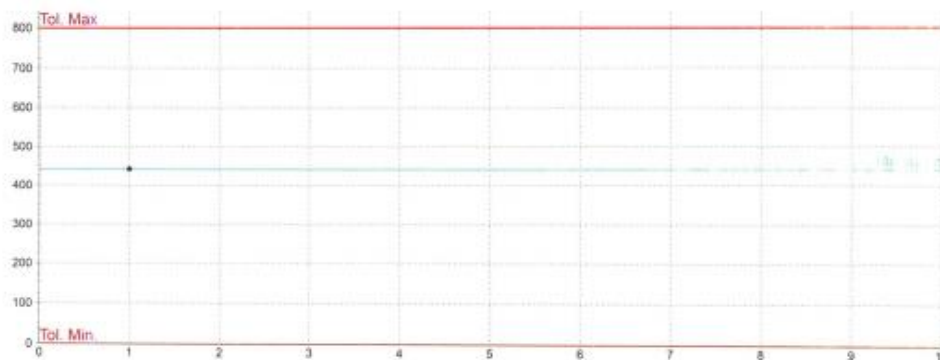
Rheinmetall Air Defence AG
Abt. ZMTT
Birchstrasse 155
8050 Zürich
T +41 (0) 44 316 3762
F +41 (0) 44 316 2059

Abnahmeprüfzeugnis n/EN ISO 10204 3.1

Eindr.Körp.: **VICKERS** Objektiv: **320x**
EW-Zeit: **12.5s** Kraft: **294.199 N**
Tol. Min.: **0.0 HV** Tol. Max: **800.0 HV**

Kunde:	ZHAW	Umrechnung nach:	
Bestell Nr.:	v. 24.11.20 (B20530)	Behandlungscharge:	
Pos./AVO:		WB-Vorschrift:	
Zeichng/Material:		Prüfvorschrift:	
Anzahl Stk.:	1	Min Härte:	441.3 HV
Bezeichnung:	Hybridwelle	Max Härte:	441.3 HV
Werkstoff Nr.:	1.6580 / 30CrNiMo8	Mittelwert:	441.3 HV Cp: 0.00
Kundenauftrag:		Standardabweichung :	0.00 Cpk: 0.00
Fertigungsauftrag:		Bemerkungen:	

Diagramm:



Messwerte:

Datum	Sequenz	Härte	Umwertung	Diagonale 1	Diagonale 2	Bemerkung
02/12/2020 08:01:18	1	441.3 HV	44.6 HRC	0.3542 mm	0.3559 mm	

Benutzer: **Klöcker**

Datum: **02/12/2020**

Visum:

1