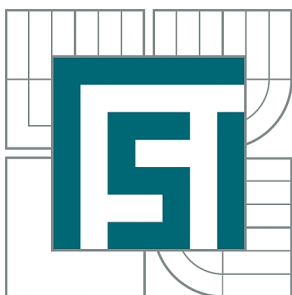


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE SIMULÁTORU UMĚLÉHO KYČELNÍHO KLOUBU

DESIGN OF ARTIFICIAL HIP JOINT TEST RIG

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

KRYŠTOF DOČKAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MARTIN VRBKA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Kryštof Dočkal

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Konstrukce simulátoru umělého kyčelního kloubu

v anglickém jazyce:

Design of Artificial Hip Joint Test Rig

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh simulátoru umělého kyčelního kloubu s těmito parametry: primárně analýza tloušťky mazacího filmu popř. tření a opotřebení, zatížení a kinematika obvyklá v umělém kyčelním kloubu, mazání hovězím sérem.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Varianty konstrukčního řešení
5. Optimální konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Bibliografie

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva, návrhový výkres, 3D digitální data (model)

Typ práce: konstrukční

Účel práce: výzkum a vývoj

Seznam odborné literatury:

Leiming Gao, Zhongmin Jin, Fengcai Wang, Peiran Yang: Different Loading and Motion Applied on Hip Simulators Affects the Lubrication of Metal-on-Metal Hip Implants. Advanced Tribology, 2010, pp 44-45

Brockett C, Fisher J. Chp 2 Experimental wear studies of total joint replacements. Biotribology, Editor J Paulo Davim ISBN 978-1-84821-275-6. Publisher ISTE/J Wiley & Sons Ltd, 2010

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 15.11.2012

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

V práci je popsán jeden z možných přístupů k návrhu simulátoru kyčelního kloubu, primárně určeného pro analýzu tloušťky mazacího filmu ve styku dvou konformně zakřivených povrchů (hlavy femuru a acetabula). Při relativním pohybu těchto dvou komponent umělých kyčelních kloubů je třeba pozorovat chování mazacího filmu mezi nimi. S pozorováním mazacího filmu souvisí i volba vhodné pozorovací metody. Při návrhu umělých kyčelních kloubů se dnes používá především simulací opotřebení na simulátorech s velmi přesnou simulací kinematiky biologických kloubů. Pro popis chování maziva mezi konformními povrchy je použita zjednodušená kinematika spolu s metodou optické interferometrie. Na simulátoru bude možné zkoumat chování vrstvy maziva za pomoci optické interferometrie.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optická interferometrie, simulace styku konformních povrchů, simulátor kyčelního kloubu, tloušťka mazacího filmu

ABSTRACT

In this thesis, is described one of possible approaches to the design of the hip joint simulation rig, primarily designed for analysis of the lubricant film thickness at the contact of two conformally curved surfaces (femoral head and acetabulum). In relative motion of those two components of artificial hip joints is necessary to observe the behavior of lubrication film between them. The observation is also related to choice of appropriate observational method. In the design of the artificial hip joint is today primarily used wear simulations on simulations rig with very accurate simulation of kinematics of biological hip joints. For description of the behavior of the lubricants between conformal surfaces is used a simplified kinematics along with optical interferometry. The simulation rig will be able to study behavior of lubricant layer using optical inteferometry,

KEY WORDS

Optical interferometry, simulation of contact of conformal surfaces, artificial hip joint simulator, lubricant film thickness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOČKAL, K. *Konstrukce simulátoru umělého kyčelního kloubu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a v seznamu uvedl veškeré literární i jiné zdroje, pod vedením doc. Ing. Martina Vrbky, Ph.D.

V Brně, dne 17.05.2013

Kryštof Dočkal

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému školiteli doc. Martinu Vrbkovi za cenné rady a trpělivost v průběhu řešení bakalářské práce. Dále pak Bc. Filipu Urbanovi, za vstřícnost a ochotu při podávání informací. Také bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu nejen při řešení bakalářské práce ale i v průběhu celého studia.

ÚVOD	13
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	14
1.1 Mechanismy opotřebení	14
1.1.1 Adhezivní opotřebení	15
1.1.2 Abrazivní opotřebení	15
1.2 Důvody k mazání kloubní náhrady	16
1.2.1 Uvolňování kloubních náhrad	16
1.3 Podmínky mazání	16
1.4 Ztížení a kinematika umělé kyčelní kloubní dvojice.....	17
1.5 Metody a přístupy k řešení simulačních modulů a simulací	19
1.5.1 Optická interferometrie.....	21
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	22
3 VARIANTY KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ	23
3.1 Varianta s portálem	23
3.2 Varianta s kuličkovým šroubem a vanou v jedné ose	24
3.3 Výběr vhodné varianty	26
3.3.1 Varianta řešení s portálem	26
3.3.2 Varianta řešení s kuličkovým šroubem a vanou v jedné ose	26
3.3.3 Vybraná varianta řešení	26
4 OPTIMÁLNÍ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	27
4.1 Kuličkový šroub	27
4.1.1 Uložení kuličkového šroubu	27
4.1.2 Dovolená axiální síla ve šroubu	28
4.1.3 Hnací kroutící moment	28
4.2 Měření velikosti zatížení	28
4.3 Ovládací mechanismus	30
4.3.1 Části synchronního řemenového převodu.....	30
4.3.2 Brzdící mechanismus	31
4.4 Přenos zatížení mezi vanou a upínací deskou	31
4.5 Uchytení hlavice a jamky	33
4.6 Ohřívací okruh	34

5 DISKUZE	35
5.1 Zatěžovací mechanismus.....	35
5.2 Ovládací mechanismus	36
6 ZÁVĚR.....	37
BIBLIOGRAFIE	38
SEZNAM ZKRATEK A POUŽITÝCH VELIČIN	40
SEZNAM OBRÁZKŮ	41
SEZNAM PŘÍLOH.....	43

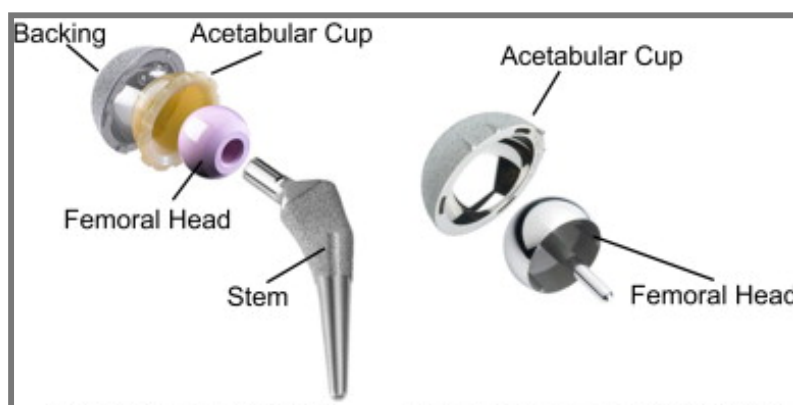
ÚVOD

Tribologie, z pohledu vědní disciplíny kombinující studium tření, mazání a opotřebení vznikala v důsledku potřeby zkoumání mazání interagujících povrchů u ložisek. Chování mazacího filmu mezi konformně zakřivenými povrchy vzniklo následně. Potřeba správného pochopení chování filmu maziva je potřeba právě i v umělých kloubních náhradách. Po implantaci kloubní náhrady se vyskytují různé procesy jak na površích implantovaného kloubu, tak mezi kloubem a okolní tkání. Cílem této práce je vytvořit tribologický modul určený ke zkoumání chování maziva mezi konformními povrchy umělých kloubních náhrad kyčelních kloubů. Dnes běžně používané přístroje pro zkoumání kloubních náhrad jsou obvykle zaměřeny na studium opotřebení a tření. Rozvoj tohoto výzkumu je dán potřebou zabránit pokud možno v co největší míře tvorbě otěrových částic na které tělo ve značné míře reaguje. Tyto simulátory zaměřené na tření a opotřebení jsou obvykle řešeny pro co nejlepší simulaci reálných pracovních podmínek vyskytujících se v kloubní náhradě. Řeší především dynamiku kloubu a mazání. V simulátorech se používá hovězí sérum, proteinové sérum, albumin označovaný BSA. BSA bývá používáno jako standart pro porovnávání, je jedním z nejvíce studovaných proteinů. BSA dobře simuluje sérum nacházející se v lidském biologickém kloubu proto je používán v mnoha aplikacích. Tyto simulační moduly ve většině případů neposkytují žádné informace o tloušťce maziva, popřípadě stupni kontaktu povrchů. Pro měření těchto vlastností kloubní náhrady se používají ultrazvukové metody měření nebo pro kvalitativní popis mazání odporové metody. Cílem této práce je navrhnout simulační modul využívající k měření tloušťky maziva optickou metodou, optickou interferometrii. U této metody vzniká problém jak „dopravit“ světlo do oblasti zkoumání, aniž by byl narušen mazací film. Používané materiály kloubních náhrad nedovolují prostup světelného paprsku, přičemž použití materiálů s dostatečnými optickými vlastnostmi vylučují jejich povětšinou značně nižší mechanické vlastnosti. V rámci řešení je použito zalisované kloubní jamky do plastové objímky. Zde je prostup světla vyřešen otvorem se zalisovanou čočkou.

Tato práce dává konstrukční řešení simulačního modulu s kinematikou kloubu redukovanou na rotaci kloubní hlavičky pod úhlem a stacionární kloubní jamku staticky zatíženou.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

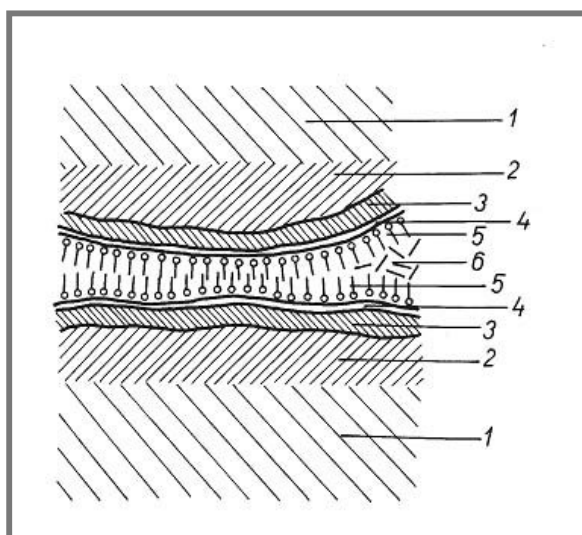
V každém kyčelním kloubu dochází ke styku dvou konformních povrchů (hlavy femuru a acetabula, Obr 1-1), kde dochází k jeho opotřebení. Opotřebení je chápáno jako postupné oddělování materiálu ze stýkajících se povrchů (třecí dvojice). K opotřebení dochází několika způsoby. Jejich působení se snažíme omezit optimalizací materiálu a podmínek mazání kontaktu.



Obr. 1-1 Schema totální kloubní náhrady a náhrady kontaktních ploch [11]

1.1 Mechanismy opotřebení

Jednotlivé procesy opotřebení materiálu se svou podstatou liší. V mnoha případech opotřebení se nevyskytují jednotlivé typy opotřebení samostatně. Působí současně s různou mírou vlivu na celkové opotřebení kontaktu. Rozlišujeme několik procesů opotřebení, a to zejména adhezivní, abrazivní, erozní, kavitační, únavové, vibrační.



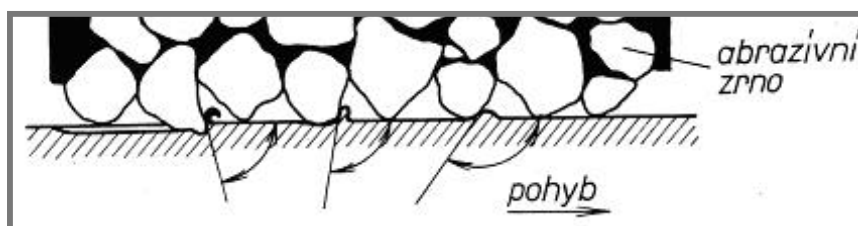
Obr. 1-2 Schema styku vrstev kovových povrchů [1] 1-Základní materiál, 2-vrstva zpevněná plastickou deformací, 3- vrstva oxidů, 4- vrstva produktů chemických reakcí, 5- adsorbovaná vrstva polárních molekul maziva, 6- vrstva maziva

1.1.1 Adhezivní opotřebení

Je způsobeno silnými adhezivními silami působícími ve styku nerovností povrchů třecí dvojice. Ke styku povrchů tedy dochází elementárně. V první fázi styku dochází k elastické deformaci, Obr.1-2 bod 2. Dojde-li k překročení meze kluzu v tlaku ve styčných plochách dochází k plastické deformaci materiálu na povrchu s nižšími mechanickými vlastnostmi. Pokud při plastické deformaci dojde k porušení povrchových vrstev začnou v místech dotyku vznikat mikrospoje. Ty se pak vlivem normálových a tečných sil porušují obvykle v místě původního styku nebo pod povrchem měkčího materiálu. Porušováním mikrospojů dochází k přenosu materiálu mezi povrchy třecí dvojice a dále k vytrhávání mikročástic z povrchu měkčího materiálu. Ty pak působí jako třetí těleso (abrazivo). Způsobují abrazivní opotřebení viz níže. Pro přenos materiálu je důležitý předpoklad porušení povrchových vrstev vzniklých oxidací nebo chemickou reakcí. Přenesený materiál vyváří na tvrdším povrchu nehomogenní povlak. Při velkých přenosech materiálu a zpětnému přenosu částic může docházet k intenzivnímu opotřebení. Některé teorie berou v úvahu nejen porušování mikrospojů, ale zahrnují vliv makro i mikronerovností. Při styku nerovností dochází k únavovému poškození v závislosti na charakteru deformace. K rýhování materiálu. Dochází k vytrhávání materiálu vysokou rychlostí[1].

1.1.2 Abrazivní opotřebení

Způsobují jej tvrdé částice ve styku s funkčním povrchem. Tyto částice nemusí být volné, ale mohou být určitým způsobem vázané, například v brusném plátně, zemině, atp. Obr. 1-3. Jiný případ, vyskytující se v kloubních náhradách je abrazivní opotřebení způsobené volnými částicemi uzavřenými mezi dvěma funkčními povrchy v relativním pohybu. Do kluzné dvojice se dostávají vlivem nedostatečného očištění nebo jako produkt adhezivního opotřebení. Abrazivní opotřebení je velmi agresivní, významný problém strojních součástí, uvážíme-li, že přibližně polovina opotřebení strojních součástí je způsobena abrazí. V základním modelu abrazivního procesu u kovů uvažujeme pevně uchycené tvrdé částice vnikající do protější plochy kluzné dvojice. Může dojít ke dvěma extrémním případům, a to kdy dochází k plastické deformaci povrchu materiálu (rýhování), kdy je materiál vytlačován do stran, kde vytváří val. V tomto případě ideálně nedochází k přenosu materiálu. Naproti tomu může být celý objem materiálu vyplňujícího rýhu odřezán ve formě třísky (mikrořezání). V reálných podmínkách ovšem může docházet spolu s abrazí k dalším degradačním procesům (únava, nadměrné zahřátí)[1].



Obr. 1-3 Působení abrazivních částic na opotřebovávaný povrch

1.2 Důvody k mazání kloubní náhrady

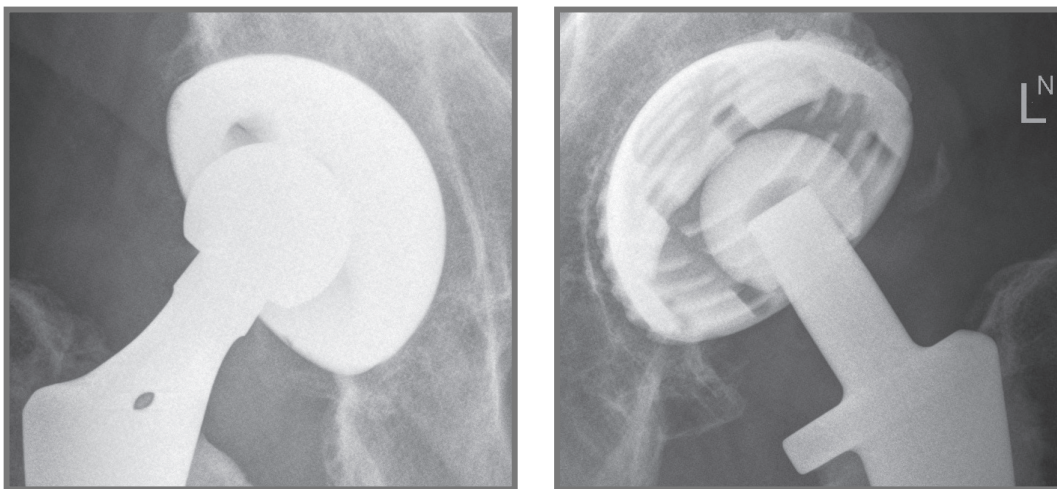
V kloubních náhradách je nutnost oddělení povrchů třecí dvojice nutnou podmínkou zajišťující dlouhou trvanlivost náhrady v těle pacienta. Dnes je považována za dostatečnou trvanlivost doba 20-25 let. Chirurgické zásahy před uplynutím této doby jsou třeba asi u 20 % případů. To je především pro mladší věkovou skupinu pacientů „krátká“ doba. Na konci rozhraní implantátu a kosti vzniká granulomatózní poškození iniciované patogeny (viry, bakterie, prvoci, plísňe, ...) nebo produkty opotřebení kluzné dvojice kloubní náhrady. Granulomatózní poškození je svou podstatou akumulace makrofágů v přilehlé tkáni. [2,3]

1.2.1 Uvolňování kloubních náhrad

Místní úbytek kostní hmoty. V mnoha stádiích je vidět v průběhu životnosti kloubní náhrady. Je to důsledek výskytu prekursorů způsobujících úbytek kostní hmoty (osteoklastů). Výskyt prekursorů je podmíněn přítomností patogenů nebo produktů opotřebení. To je možno ovlivnit optimalizací návrhu kluzné dvojice náhrady (materiál, profil povrchu, ...). Pro optimalizaci je třeba znát podmínky, za kterých je umělý kloub v provozu (teplota, chování maziva, velikost zatížení, ...)[3].

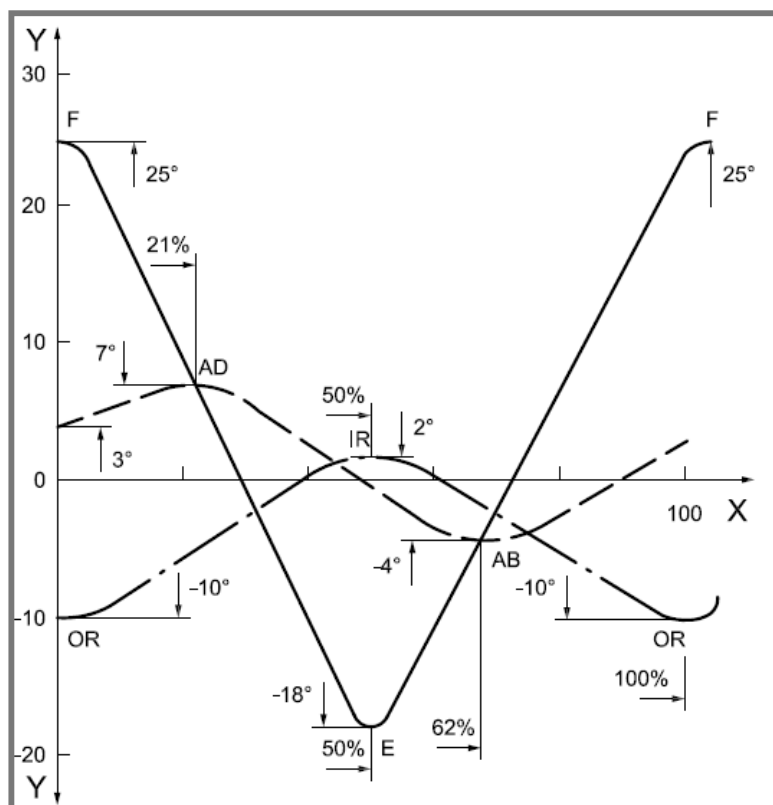
1.3 Podmínky mazání

V lidském kloubu je jeho kluzná část obklopena okolní tkání a mezi hlavou femuru a acetabulem se nachází proteinové sérum. Tento stav odpovídá plně zatopené zkušební jamce a hlavici v simulátorech, kde je ovšem místo lidského proteinového séra použité sérum hovězí (BSA). To je předepisováno normou ISO [10]. Při měření je pak nutno uvádět jeho charakteristické vlastnosti (množství, koncentraci proteinů, teplotu, ...). BSA je zahříváno na tělní teplotu, aby bylo docíleno co nejlepší shody se skutečným implantátem.



Obr. 1-4 Různé materiály a typy provedení umělých kyčelních kloubů, nalevo kovová hlava i jamka, (Metal-Metal) provedení, napravo provedení keramické. Jednotlivé kloubní náhrady jsou od různých výrobců proto je v obou případech jiná geometrie.

V takto zatopeném kontaktu dochází k elastohydrodynamickému mazání třecí dvojice. Tento případ mazání vzniká z elastické deformace partnerů třecí dvojice a závisí na zvýšení viskozity pod tlakem. V lidských kyčelních kloubech dochází k EHL mazání díky elastické deformaci chrupavky. Ta má mnohem menší modul pružnosti než materiály používané v kloubních náhradách. Chrupavce se navíc vlivem místních tlaků sníží součinitel tření při zatížení z cca 0.07-0.45 μm (nezatížená chrupavka) na 0.005-0.037 μm . To je v porovnání s umělými kloubními náhradami CoCrMo na Pe (polyethylen), u kterých se koeficient tření pohybuje okolo 0.06-0.08 μm . U kloubních náhrad model mazání závisí na použitých materiálech partnerů třecí dvojice. U tvrdé kloubní hlavice a měkké jamky (Hard-Soft), spojení PE a kovu nebo PE a keramiky dochází k meznému mazání, vlivem deformací Van der Walsových sil, přičemž hlavním důvodem mezného mazání je právě deformace vycházející z visko-elasticity polymeru. U tvrdé hlavice a tvrdé jamky (Hard-Hard), použití kovu, keramiky nebo jejich kombinací byly provedeny experimenty [5,6,7], ze kterých vyplývá následující: u malých průměrů kloubních hlavic dochází k meznému mazání, u větších průměrů pak ke smíšenému nebo elastohydrodynamickému. [4]



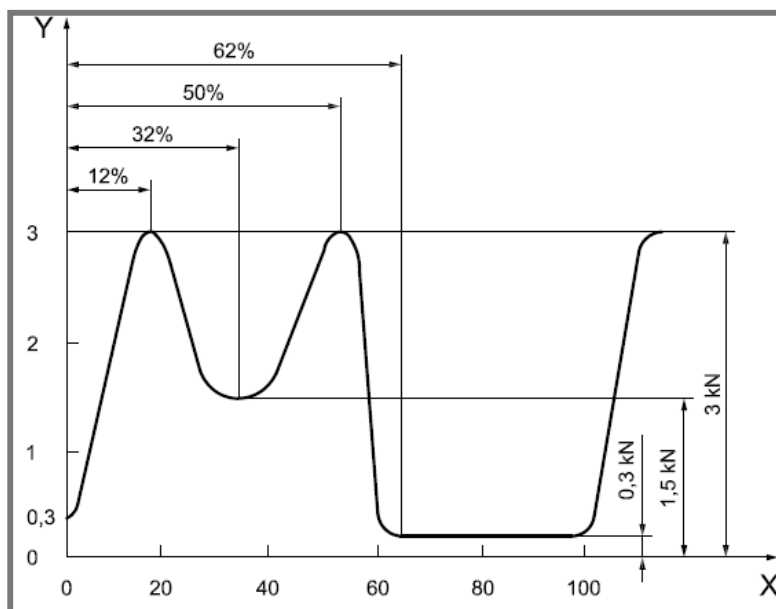
Obr. 1-5 Kinematika Gaitova cyklu. [8] X- procentuální čas cyklu, Y- úhel natočení hlavy femuru ve stupních, AB- abdukce, AD- adukce, E- extenze, F- flexe, IR- rotace vnitřní, OR- rotace vnější.

1.4 Ztížení a kinematika umělé kyčelní kloubní dvojice

1.4

Při testování kloubních náhrad v komerčních simulátorech se běžně postupuje dle postupu daném normou ISO 14242, která udává přesný postup při měření. Zároveň udává i kinematiku a zatížení pro použití na simulátorech. Norma samotná je zalo-

žena na Gaitově cyklu - Obr.1-6,Obr 1-7. Ten popisuje velikosti přenášeného zatížení kloubem v průběhu cyklu chůze. Komplexní měření zatížení přenášeném kyčelními klouby měřil Bergman a kol. Ve své práci [12] popisuje zatěžovací podmínky pro běžné denní aktivity (chůze, běh, chůze do schodů a další...).[11]

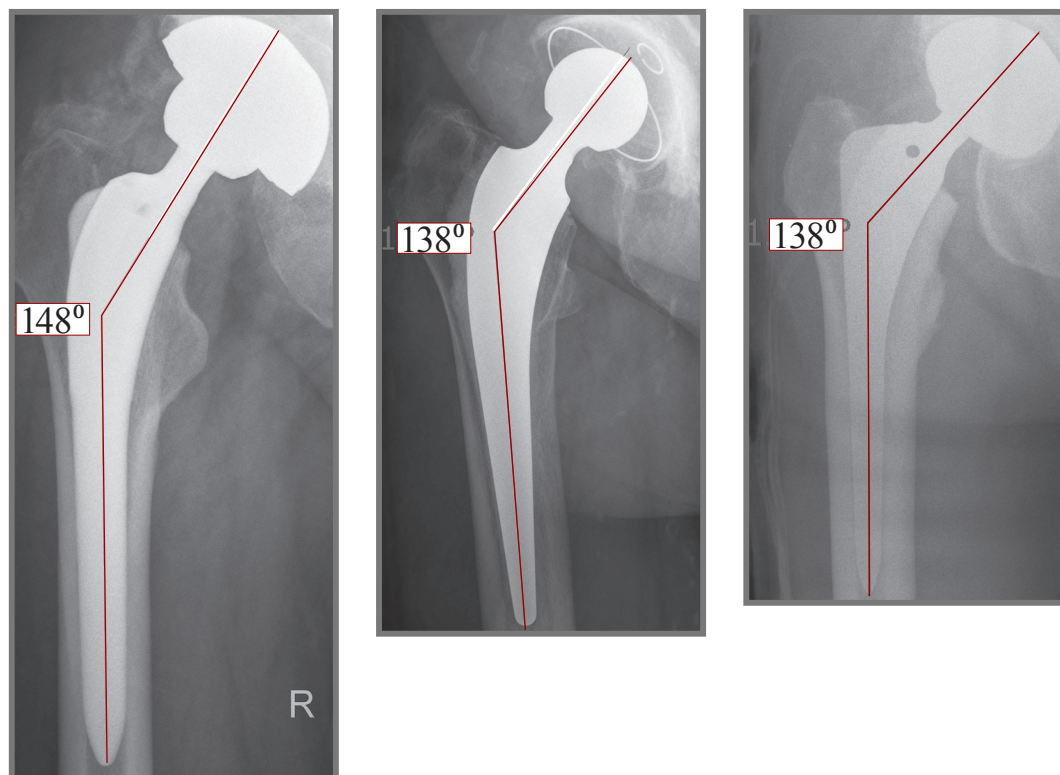


Obr. 1-6 Zatížení dle Gaitova cyklu. [8] X- procentuální čas cyklu, Y- velikost zatížení přenášeného kyčelním kloubem,

Ve svých publikacích mnoho autorů uvádí zatížení kloubu nebo také kontaktní síly v kloubní dvojici, bohužel studie týkající se kinematiky kloubu jsou publikovány jen velmi zřídka. To je dáno velkými variacemi v geometrii jak biologických tak umělých kloubů. Rozdíly vznikají u různých věkových a rasových skupin pacientů, dále pak při různých růstových odchylkách. Rozdíly jsou i u kloubních náhrad, kde mají výrobci možnost upravit jejich tvar - Obr.1-4,Obr.1-7. Proto studie zabývající se touto problematikou vyžadují značně rozsáhlá měření, což v důsledku znamená zřídka publikování takovýchto studií. [11]

Rozdíly jsou vidět na RTG snímcích pánevní oblasti. Po změření os jsou vidět rozdíly mezi jednotlivými úhly - Obr. 1-7. Norma [8] uvádí úhel mezi osou zatížení a čelní rovinou acetabulární části totální kloubní náhrady (dále jen THR) je $60^\circ \pm 3^\circ$. Profesor Zhongmin Jin z Institutu lékařského a biologického inženýrství uvádí v jedné ze svých prezentací hodnotu tohoto úhlu 55° . I zde je tedy vidět určitý rozdíl. Navíc dnes již není možné mluvit o pacientech s THR jako o určité věkové skupině pacientů, kde by se ještě dala hledat většinová shoda co se týče geometrie a kinematiky THR. Proto simulátory navržené ať už pro zkoumání opotřebení nebo jako v případě této práce pro měření mazacího filmu mohou jen stěží pokrýt všechny kategorie pacientů potřebujících totální kloubní náhradu.

Kinematiku pro simulace THR tedy předepisuje norma. Ta je založena na Gaitově cyklu udávajícím průběh posuvů a zatížení v jednotlivých směrech. U simulátorů, kde se nejčastěji uvažuje vertikální zatížení a z pohybů flexe-extenze. Ostatní pohyby kloubu, abdukce-adukce, rotace vnitřní-vnější a zatížení v horizontální rovině se pak vyskytují méně často.[11]



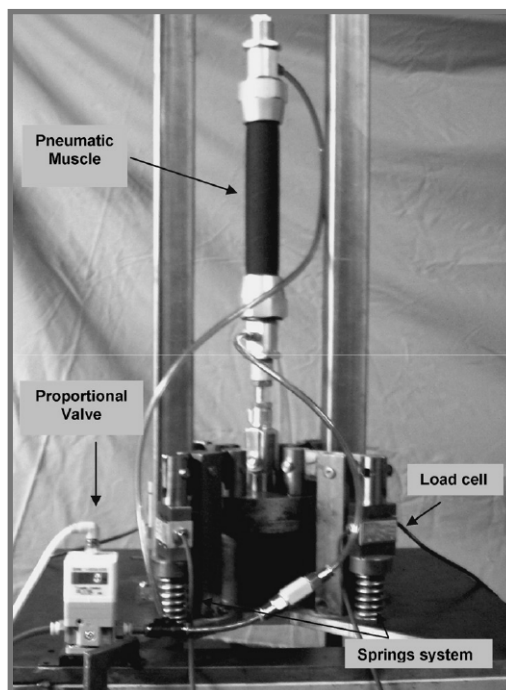
Obr. 1-7 RTG snímky kyčelních kloubů. Jsou zde naznačené osy ukazující variabilnost konstrukcí. U těchto snímků jsou úhly zleva 148, 138, 138. Každý kyčelní kloub je od jiného výrobce, což je patrné z jejich tvaru.

1.5 Metody a přístupy k řešení simulačních modulů a simulací

1.5

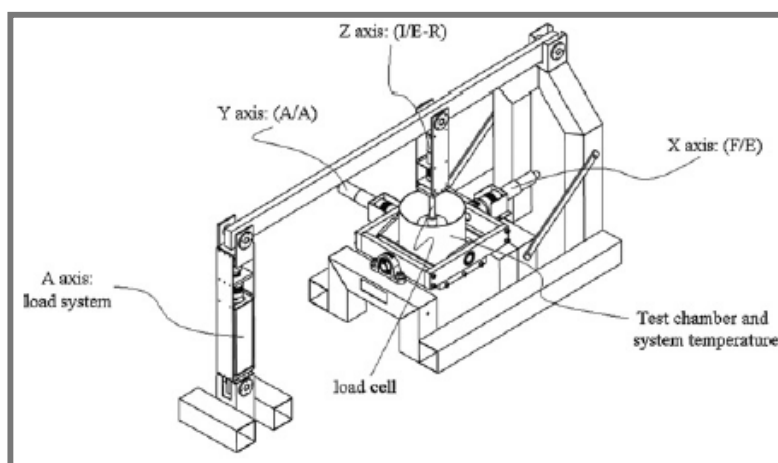
Možností jak řešit konstrukční stránku simulačního modulu ať už pro studium opotřebení nebo mazacího filmu je hned několik. Jednotlivé moduly se rozlišují hlavně uspořádáním kloubní hlavice-kloubní jamka, řešením zatopení zkoumaného kontaktu a mechanismem pro vyvození potřebného zatížení. Dále jsou potom rozdíly v metodě používané pro samotné studium. U simulátorů realizujících věrnou kinematiku je obvykle použito jednoho ze dvou přístupů realizace zatížení, a to buď pomocí hydraulického popř. pneumatického mechanismu nebo pomocí servomotorů a lineárních posuvů, pák. Vyvození zatížení skrze hydraulický nebo pneumatický mechanismus - Obr. 1-8 má výhodu v měření velikosti zatížení. Poslouží zde manometr, jehož výhodou je především cena. Ta ovšem nabude výhodou u vybavení potřebném k provozování tohoto typu mechanismu (především potřeba udržování tlaku v hydraulickém nebo pneumatickém obvodu). Taký je zde nebezpečí úniku pracovního média z obvodu. Použití konstrukce zatížení v simulačním modulu založené na servomotech a lineárních posuvech je v mnoha ohledech výhodnější než předešlý konstrukční přístup, ale má poměrně velké požadavky na přesnost jednotlivých dílů - Obr.1-10. V systému se taky nachází velké množství pohyblivých částí, které je potřeba udržovat v provozuschopném stavu. Velkou výhodou má tento přístup v možnosti jednoduchého upravení kinematiky úpravou řídicího programu.

Metody pro zkoumání mazacích filmů mají dvě charakteristické skupiny a to metody pro přímé a nepřímé měření. Obě tyto skupiny zahrnují metody měření, které nedokáží podat úplné informace o zkoumaném mazacím filmu. Jsou zde také některé



Obr. 1-8 Simulátor pro měření na vzorku hlavy acetabula (průměr 30mm) a kloubní jamky [16]. Názorně ukazuje aplikaci pneumatického systému. Springs system- systém pružin, Load cell- siloměr, Pneumatic muscle- pneumatický sval, Proportional valve- proporcionální ventil

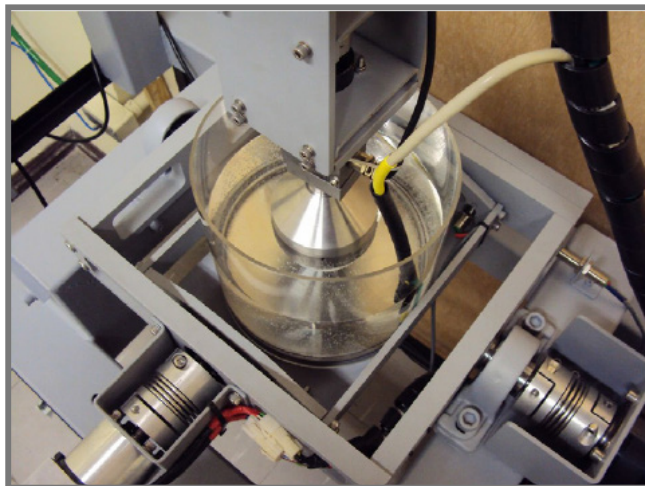
metody vyvinuté přímo na kovových kloubních náhradách. Jedná se převážně o nepřímé metody. Jedna z nich využívá elektrického odporu přechodových vrstev mezi kloubní jamkou a hlavicí. Podle velikosti procházejícího proudu těmito vrstvami je možné určit kvalitativní vlastnosti mazacího filmu. O tloušťce mazacího filmu nedává tato metoda žádné informace. Také je možno použít metodu založenou na ultrazvuku, kde jsou signály snímány pomocí piezoelektrického snímače.[4]



Obr. 1-9 Schema simulátoru vyvolujícím zatížení pomocí páky. Test chamber and system temperature- Vana s testovaným vzorkem a systémem ohřevu, Load cell- siloměr, X,Y,Z axis- osy servomotorů.

V polední době by bylo také možné použít ke zkoumání RTG záření. Při zajištění dostatečně malého zdroje záření (myšlena fyzická velikost) a zároveň citlivého snímače na druhé straně zkoumaného objektu, mohlo by se touto metodou získat snímky ukazující tloušťku mazacího filmu bez vnějšího zásahu. Metodou mikroradiografie

se dnes zkoumají například semena rostlin, jejichž rozměry nepřesahují tři milimetry. Při snímání mazacího filmu z více uhlů by pak bylo možné získat 3D digitální model filmu nacházejícího se mezi jednotlivými částmi kloubní náhrady. Mezi jednotlivými řezy by se model dopočítal obdobným způsobem jako u tomografu (CT). Simulační modul pro využití této metody by vyžadoval navržení vhodné konstrukce pro namontování do již fungujícího zařízení.

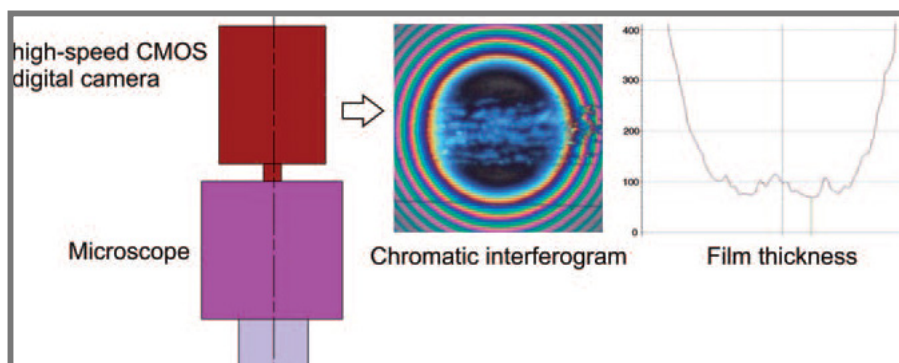


Obr. 1-10 Reálná podoba simulátoru podle schématu Obr 1-9

1.5.1 Optická interferometrie

Velmi významnou metodou pro zkoumání mazacích filmů je metoda optické interferometrie. Je běžně používanou při měření mazacích filmů mezi nekonformními povrchy. Velmi často jsou to ocelová kulička a skleněný disk. Tato metoda původně nebyla optimalizována a měla nedostatky. Lepší výsledky se podařilo dosáhnout zlepšením optických vlastností jednotlivých komponent, přes které prochází světelní svazek. Hartl a kol. publikoval její optimalizaci pro studium tenkých mazacích filmů [13]. Publikace popisovala celé řešení, v němž bylo použito optického mikroskopu s vysokorychlostní kamerou. Princip ukazuje Obr. 1-11.

Výstup z metody optické interferometrie je interferogram, soustava barevných kruhů. Z jejich pozic a jednotlivých amplitud je pak možné získat průběh tloušťky maziva napříč interferogramem.



Obr. 1-11 Schema metody optické interferometrie tak jak ji publikoval Hartl a kol. [17] High-speed CMOS digital camera- vysokorychlostní kamera s CMOS snímačem, Microscope- mikroskop, Chromatic interferogram- interferogram, Film thickness- tloušťka mazacího filmu.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

U simulací tenkých mazacích filmů kde se tloušťka filmu pohybuje v oblasti jednotek až stovek mikrometrů je zapotřebí co nejužší aparatury. Také je třeba zajistit aby se při chodu simulačního modulu nevyskytovaly rázy. Ty by negativně ovlivnily měření. Účelem této práce je vytvořit návrh simulačního modulu pro pozorování mazacího filmu ve styku dvou konformních povrchů. V tomto případě styk kloubní hlavice a jamky kyčelního kloubu. Je třeba také zajistit vhodné podmínky pro měření. Možnost ohřevu maziva, změna velikosti zatížení... Byla zde také snaha o využití již používaných částí z jiných dostupných simulačních jednotek na VUT FSI Ústavu konstruování.

Návrh simulátoru umělého kyčelního kloubu požaduje:

- Shromáždění znalostí o používaných simulátorech a zvolení vhodného konceptu simulačního modulu vhodného pro podmínky laboratoře.
- Zvolit vhodnou metodu měření zatížení. Běžně se užívá tenzometrů, pro komfortnost a přesnost měření.
- Najít vhodné řešení pro vyvinutí zatížení 3 kN. Takto velké zatížení není u simulátorů kulička-deska nebo váleček-deska zabývajících se studiem tloušťky maziva potřebné.
- Simulátory pro studium mazacích filmů nejsou v oblasti lékařství běžné. Většina běžně používaných simulátorů je zaměřena na studium tření a opotřebení.
- Mechanismus výměny průměrů hlavic a jamek. Možnost jednoduché a časově nenáročné výměny jednoho průměru styčné dvojice za jiný.

3 VARIANTY KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

3

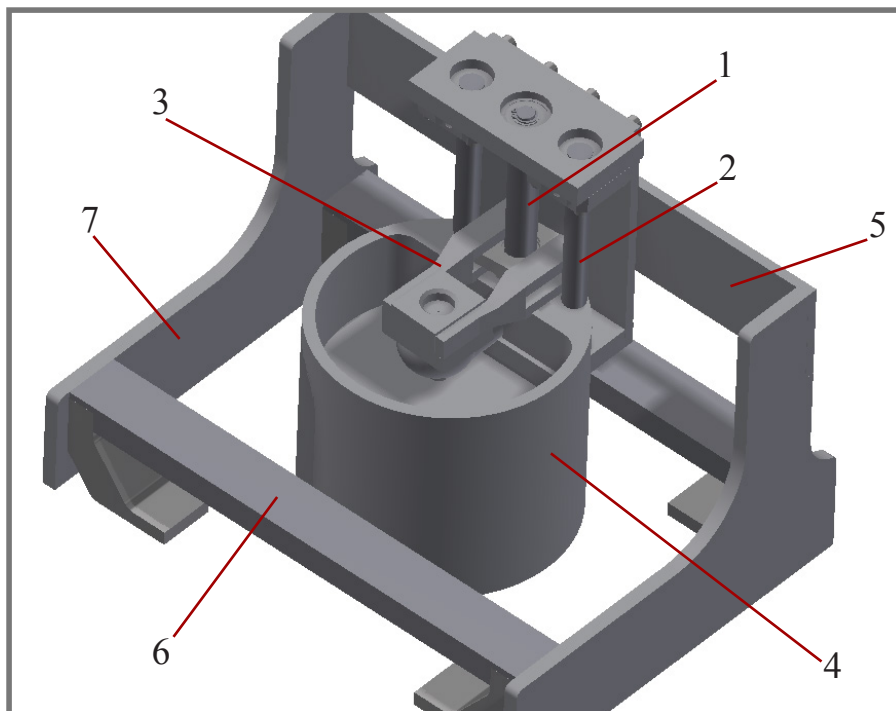
Celkem byly navrženy dva přístupy k řešení. Z nich byla vybrána varianta lépe odpovídající požadovaným cílům.

3.1 Varianta s portálem

3.1

Tato varianta je inspirována konstrukcí stolních gravírovacích frézek. Celá konstrukce (ukázána na Obr.3-1) zahrnuje dvě hlavní části, a to rám s portálem obsahujícím dále posuvy a vanu, ve které se nachází mazivo a otáčející se hlavice.

Rám s portálem je přes boční profily upevněn ke stolu, ke kterému je také samostatně připevněna vana s hlavici jako samostatný celek. Boční profily jsou ve spodní části spojeny dvěma U profily zajišťujícími tuhost. V horní části je umístěn obdélníkový profil tvořící samotný portál. K bočním profilům je připevněn silovým stykem pomocí šroubů a umístěn do vybrání na vrcholech bočních profilů. Tvar portálu je v koncepci řešení tak, aby co nejlépe odolával momentu vznikajícímu od přenosu zatížení ze zkoumaného kontaktu. Na portálu je umístěna příčně konzole se dvěma vodícími tyčemi a kuličkovým šroubem uprostřed. Kuličkový šroub dokáže vyvodit velké zatížení při relativně malém ovládacím kroutícím momentu na vstupu, spolu s malými zástavbovými rozměry. Vyvození kroutícího momentu na kuličkovém šroubu pak může zajistit krokový motor dostatečně výkoný pro udržení patřičného kroutícího momentu. Zatížení na samotnou kloubní jamku se přenáší pomocí dvou nosníků z matice kuličkového šroubu. Na tu je díky tomuto uspořádání vyvozován kroutící moment způsobující její nerovnoměrné zatížení, což si v důsledku vyžádá zástavbově větší uložení kuličkového šroubu a jeho kratší životnost.



Obr. 3-1 První konstrukční řešení - varianta s portálem, 1- Kuličkový šroub, 2- Vodící tyče, 3- Nosníky, 4- Vana, 5- Most portálu, 6- U-profil, 7- Boční profil

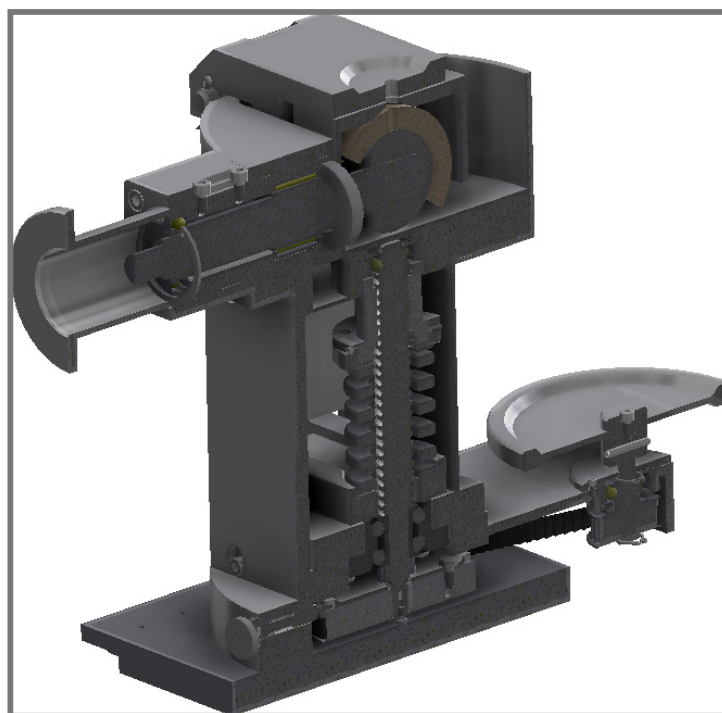
Druhá, samostatná část tohoto konstrukčního řešení je vana obsahující hřídel pro nasazení otáčející se hlavice upevněná samostatně na stole. Hřídel je v rámu vany podepřena jehličkovým ložiskem zajišťujícím radiální únosnost a ložiskem radiálním kuličkovým zajišťujícím hřídel proti axiálnímu posunutí od sil vznikajících díky uchycení hlavice na hřídel kuželem.

Tato varianta má velkou variabilitu v posuvech kde je možné díky dvěma odděleným částem volit posuv vany a portálu samostatně. To zajistí dobrou vzájemnou polohovatelnost a značně zjednoduší upínání jamky a hlavice. V důsledku bude pojezd vany přenášet tlakové zatížení a upnutí portálu zatížení tahové. U portálu je tedy nutný větší zástavbový prostor pro konstrukci posuvů schopných snášet tahové zatížení. Takových u kterých nehrozí demontáž vlivem tahových sil působících na pojezd. Takovéto posuvy by prodražily cenu celé konstrukce díky potřebě většího množství materiálu pro výrobu.

Pro měření velikosti zatížení se zde nabízí tenzometr. Může být umístěn v zatěžujícím elementu mezi jamkou a rámem nebo mezi vanou a pojezdem.

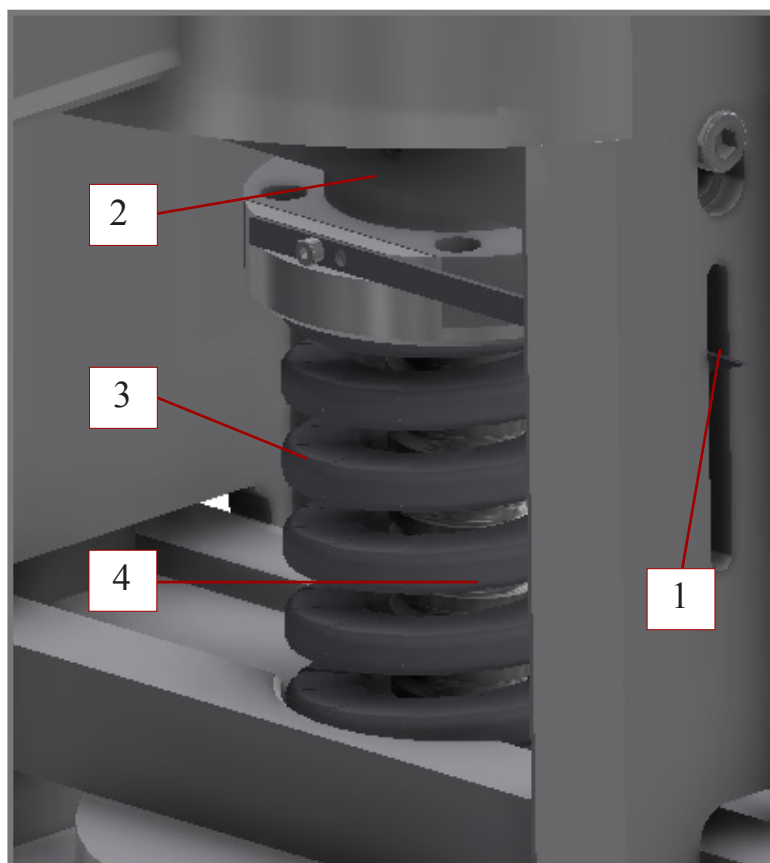
3.2 Varianta s kuličkovým šroubem a vanou v jedné ose

Druhá varianta řešení (Obr.3-2) staví vanu a kuličkový šroub nad sebe, kde využívá výhod symetrie zatížení. Upevnění ke stolu je řešeno přes pojezd již používaný v laboratoři VUT FSI Ústavu konstruování, pomocí dvou šroubů. Tyto šrouby drží upínací desku, ve které je upevněno ložisko s kuličkovým šroubem vyvozujícím zatížení. Druhá strana kuličkového šroubu je uložena ve spodní části vany. Vana je přes obdélníkové profily připevněna k upínací desce pomocí šroubů. Celek je modifikován tak aby šrouby nepřenášely pokud možno žádné zatížení. Celé zatížení je tak přenášeno pomocí tvarového styku profilů s dosedací plochou vany a upínací desky.



Obr. 3-2 Druhé konstrukční řešení

Kuličkový šroub je v tomto případě poháněn synchronním řemenem díky nedostatku zástavbového prostoru pro přímý náhon z krokového motoru. Velikost elektropohonu je menší než v předchozí variantě. Za to může řemenový převod zajišťující převod do pomala. Z kuličkového šroubu je zatížení přes desku a táhla přenášeno do zatěžujícího členu představující můstek spojující obě táhla pomocí čepů. Ovládání kuličkového šroubu přes řemenici je možné pomocí krokového motoru nebo pro dostatečně malé zatížení je možné ovládání ruční přes ovládací kolo. Zajištění proti pootočení kuličkového šroubu zajišťuje brzdná soustava sestávající z brzdného disku a kolíku. Brzdný kolík je do drážek disku dotlačován pružinou.



Obr. 3-3 Druhé konstrukční řešení, 1- Ukazatel zatížení (stlačení pružiny), 2- Matice kuličkového šroubu, 3- Pružina, 4-Kuličkový šroub

Velikost zatížení je zde měřena nikoliv pomocí tenzometru, ale jednodušší a levnější metodou pomocí pružiny. Ta při daném stlačení vyvolá sílu působící přes táhla na hlavici. Velikost zatížení snímáme pomocí ukazatele stlačení na stupnici vyznačenou na boční straně simulátoru po kalibraci pružiny.

Celá konstrukce je koncipována tak, aby maximálně využila výhod symetrie. Je zde také snaha, aby přenášené zatížení vyvolávalo tlaková a tahová napětí, nikoliv ohybové a kroučící momenty jak tomu bylo u předchozího případu.

3.3 Výběr vhodné varianty

Ze dvou předložených řešení bylo vybráno vhodnější řešení z pohledu cílů práce. Byla posouzena vhodnost pro použití v laboratoři, využití výhod použitých součástí a konstrukce jako celku. Posouzeny byly nedostatky z pohledu namáhání a náročnost na zástavbové prostory.

3.3.1 Varianta řešení s portálem

U první varianty je možné dosáhnout velmi malé zástavbové výšky. Nehrozí zde nebezpečí nedostatku místa mezi objektivem mikroskopu a sledovaným kontaktem, vezmeme-li v úvahu prostor pro zaostření mikroskopu. Vanu je zde možné umístit velmi nízko a zároveň portál se zatěžujícím mechanismem stojí bokem, nad vanou jsou pouze nosníky s držákem jamky, které ovšem nezabírají velkou výšku. Nevýhodou je zde velké zatížení kuličkového šroubu a nosníků přenášejících zatížení na držák jamky. Také zde pro dosažení dostatečné tuhosti bude zapotřebí masivní konstrukce, jejíž váha již nebude zanedbatelná. Tato konstrukce má i značné nároky na zástavbový prostor, bude pro ni tudíž třeba dostatečně velká základna pro její uchycení. Výhodou této konstrukce je pak dobrá vzájemná polohovatelnost vany s hlavicí a portálu s jamkou.

3.3.2 Varianta řešení s kuličkovým šroubem a vanou v jedné ose

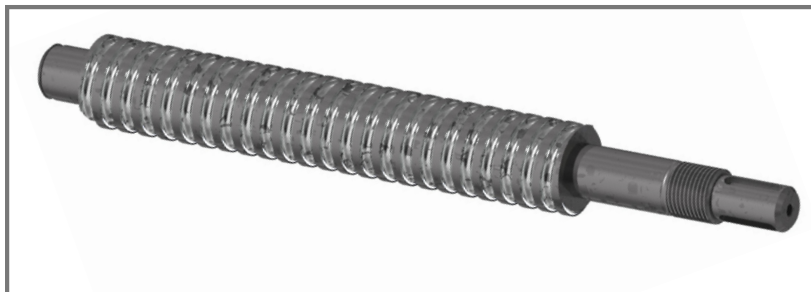
Tato varianta má výhodu v dobrém přenosu zatížení. Nevznikají zde zatěžující momenty v takové míře, jako v předchozím případě. Je zde také menší zástavbový prostor pro simulátor jako celek. Nevýhodou je poměrně velká výška simulátoru což je důsledek umístění upínací desky, kuličkového šroubu a vany nad sebe. Výhodou je menší hmotnost oproti předchozímu případu a lepší tuhost. Pro pojezd je zde využito již osvědčeného mechanismu používaného u stávajících simulátorů. Konstrukce lépe využívá malých rozměrů kuličkového šroubu, také je levnější oproti předchozí variantě kde je použit tenzometr na místo pružiny.

3.3.3 Vybraná varianta řešení

Výsledná varianta byla zvolena varianta s kuličkovým šroubem a vanou v jedné ose. Důvody, které vedly k tomuto rozhodnutí jsou především menší zástavbový prostor, vyšší tuhost a v neposlední řadě i cena provedení. Z důvodu zástavbových rozměrů a povahy konstrukce se první varianta nehodí pro laboratorní měření. Proto zůstalo řešení první varianty pouze v oblasti koncepčního návrhu.

4 OPTIMÁLNÍ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Zvolené konstrukční řešení je řešené s ohledem na dostupnost jednotlivých kupovaných částí, tak aby nebylo obtížné je získat. V tomto řešení je také snaha použít již některé součásti používané v laboratořích VUT FSI Ústavu konstruování.



Obr. 4-1 Kuličkový šroub

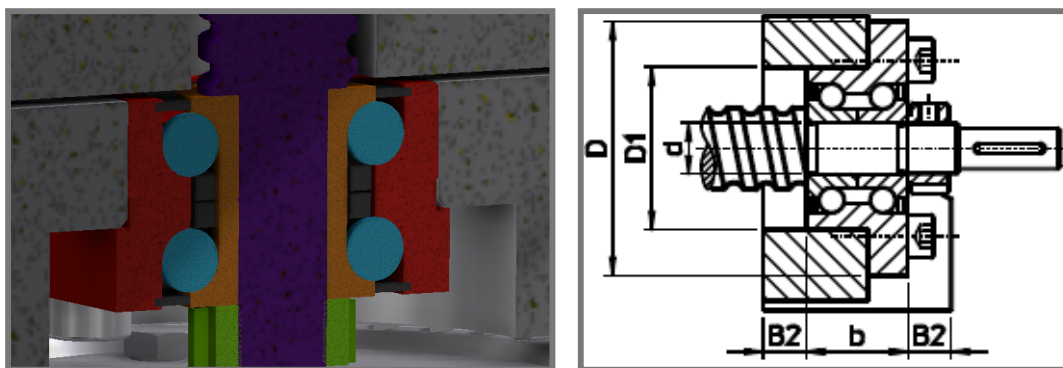
4.1 Kuličkový šroub

4.1

Kuličkový šroub je volen ze sortimentu firmy HIWIN s.r.o., která je schopná dodat modifikovanou verzi šroubu s patřičnou délkou dle potřeb simulátoru. Firma ve svém katalogu též uvádí, že je schopná dodat upravené konce kuličkového šroubu dle potřeb zákazníka.

4.1.1 Uložení kuličkového šroubu

Uložení kuličkového šroubu - Obr.4-2 je řešeno pomocí dvou ložisek. Axiální síly ve šroubu zachytává ložisko axiální kuličkové s kosoúhlým stykem ZKLF dodávané firmou Schaeffler CZ s.r.o. Tyto ložiska jsou montována pomocí příruby a šroubů. Ložisko je takto uchyceno v upínací desce pomocí čtyř šroubů pevnostní třídy 10.9. Konec kuličkového šroubu je uchycen v upraveném konci typu S2 [14]. Průměr s perem je upraven podle potřeb simulátoru. Druhý konec šroubu je v provedení S5 [14] standardně dodávaného výrobcem. Výpočet ložisek není nutný, jelikož výrobce doporučuje ložiska přímo pro konkrétní průměry kuličkového šroubu.



Obr. 4-2 Uchycení kuličkového šroubu v upínací desce [14] Nalevo pohled na model simulátoru, napravo doporučené uchycení dle výrobce.

4.1.2 Dovolená axiální síla ve šroubu

Výpočet šroubu je veden dle katalog produktu dle výrobce [14]. U šroubu je zkontrolována maximální velikost přenášené axiální síly. Ta vychází z nepodepřené délky šroubu l_k a průměru šroubu d_k , a z vlivu typu uložení konců kuličkového šroubu. Ty se zahrnují koeficientem závislosti na uložení k_k . [14]

$$F_k = k_k \cdot \frac{d_k^4}{l_k^2} \cdot 10^5 = 1.03 \cdot \frac{20^4}{110^2} \cdot 10^5 = 1\,362 \cdot 10^3 \quad [N] \quad (1)$$

Vypočtená síla F_k je maximální teoretická dovolená síla. Ta je následně snížena na jednu polovinu. Výsledkem je pak maximální dovolená provozní síla F_{kmax} . [14]

$$F_{kmax} = 0.5 \cdot F_k = 0.5 \cdot 1\,362 = 681 \quad [kN] \quad (2)$$

Velikost dovolené provozní axiální síly značně přesahuje provozní zatížení šroubu v simulátoru. To je důsledek malé nepodepřené délky šroubu. Velikost síly je také možné přibližně odečíst z grafu uvedeném v [14]

4.1.3 Hnací kroutící moment

Závislost mezi hnacím kroutícím momentem a odpovídající silou, kterou vyvodí kuličková matice udává vztah pro závislost hnacího kroutícího momentu na axiální síle z katalogu výrobce [14]. Velikost momentu je závislá na stoupání závitu šroubu P , velikosti axiální síly F a účinnosti kuličkového šroubu η . Tu výrobce udává pro standardní aplikace 0.88. Výsledná velikost momentu odpovídající síle 3 kN je velkou výhodou použití kuličkového šroubu. [14]

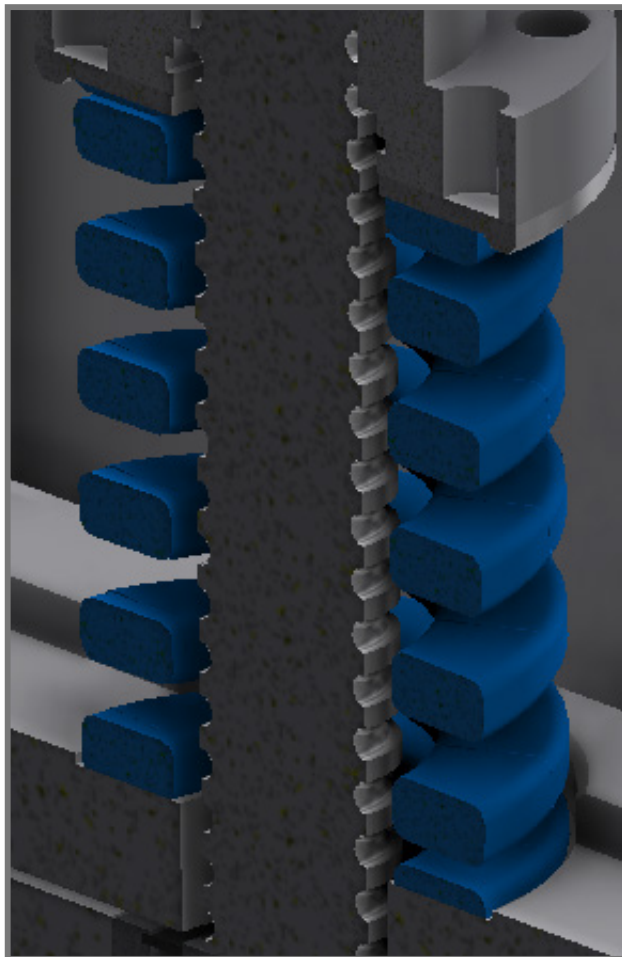
$$M_k = \frac{F \cdot P}{2\,000 \cdot \pi \cdot \eta} = \frac{3\,000 \cdot 5}{2\,000 \cdot \pi \cdot 0.88} = 2.71 \quad [N \cdot m] \quad (3)$$

Z ohledem na velikost potřebného hnacího momentu je voleno i stoupání 5 mm. U zvoleného výrobce jsou i alternativy stoupání 10 a 20 mm. Použitím větší hodnoty stoupání závitu šroubu by se zvýšil také potřebný hnací moment a snížila cena kuličkového šroubu.

4.2 Měření velikosti zatížení

Velikost zatížení je měřena jako míra stlačení pružiny. Pružina je volena nástrojová dle odpovídající normě ISO 10243 - Obr.4-3. Tento typ pružin se vyznačuje obdélníkovým profilem drátu vyráběné z chromvanadiové oceli. Nástrojové pružiny jsou konstruovány pro co nejvyšší výkon a co nejmenší zástavbové prostory. Povrch pružin je navíc kuličkován. Pružiny se vyrábí ve čtyřech základních kategoriích odlišených vzájemně barvou podle velikosti zatížení. Od zelené barvy v kategorii mírné zatížení přes modrou a červenou až po žlutou pro velmi vysoké zatížení. [15]

Pružina byla volena pro kompromis mezi celkovou výškou pružiny v nezátíženém stavu a výškou pružiny v provozním stavu, kdy je síla vyvozená pružinou rovna 3 kN. Z tohoto pohledu vyhovují nástrojové pružiny s obdélníkovými profily drátu lépe než častěji používané tlačné pružiny.



Obr. 4-3 Pružina nasunutá na kuličkovém šroubu v pracovní poloze

Pružina je volena od firmy Henlich s.r.o. v modrém provedení (kategorie středních zatížení) v délce v nezátíženém stavu 64 mm a při plném zatížení 34 mm. Tuhost pružiny uváděná v katalogu je $209 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$. Stlačení pružiny při pracovním zatížení by se tak mělo pohybovat okolo 1.5 cm. Přesná velikost stlačení pružiny závisí na konkrétním kusu pružiny, jelikož tuhost má toleranci řádově v procentech. V důsledku bude třeba po montáži pružinu na konkrétním vyrobeném kusu zkalibrovat.

Pružina má vnitřní průměr 25 mm a vnější průměr 50 mm. Vnitřním průměrem prochází kuličkový šroub. Pružina je z jedné strany opřena o matici a z druhé strany tlačí do táhel přenášejících zatížení do zkoumaného kontaktu.

4.3 Ovládací mechanismus

Ovládací mechanismus simulátoru je tvořen řemenovým převodem mezi velkou řemenicí nasazenou na kuličkovém šroubu a malou řemenicí spojenou hřídelí s ovládacím kolem. Ovládání je díky synchronnímu řemenovému převodu do pomala a malému hnacímu kroučicímu momentu řešeno ručně. Moment potřebný pro ovládání simulátoru M_{ov} je vypočten z hnacího kroučicího momentu M_k , předpokládaných otáček n_1 a n_2 účinnosti řemenového převodu η_r a výkonů P_t a P_s . Ztráty v ložiscích jsou zanedbány.

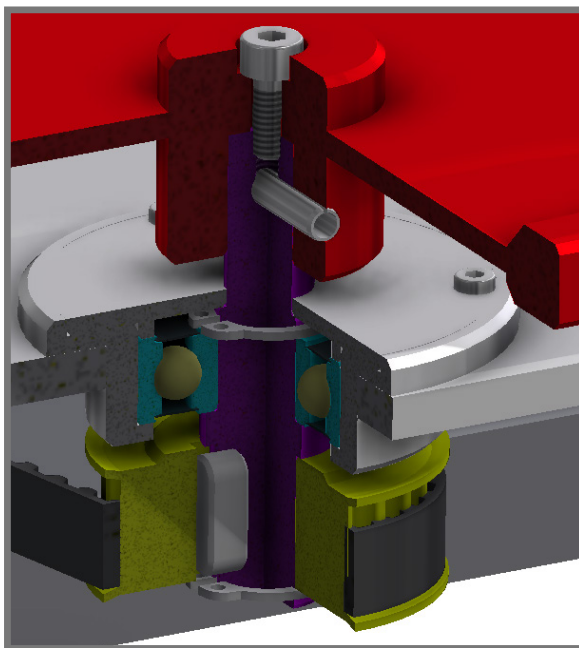
Z výpočtů je vidět, že velikost potřebného ovládacího momentu je značně malá.

$$P_t = M_k \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_2 = 2.7 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{400}{60} = 113 \quad [W] \quad (4)$$

$$P_s = P_t \cdot (2 - \eta_r) = 113 \cdot (2 - 0.88) = 126.6 \quad [W] \quad (5)$$

$$M_{ov} = \frac{P_s}{2 \cdot \pi \cdot n_1} = \frac{126.6}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{1000}} = 1.2 \quad [N \cdot m] \quad (6)$$

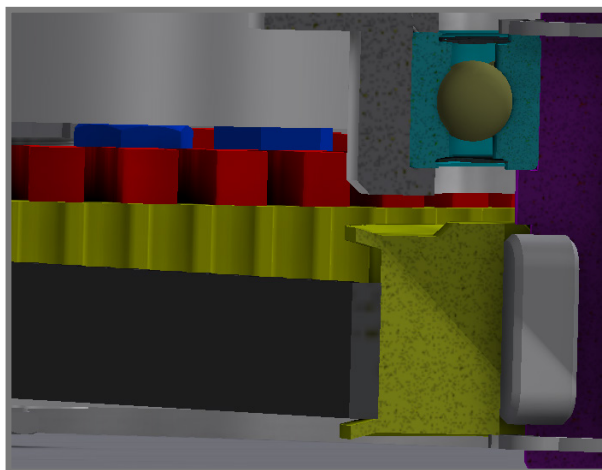
Vhodná pro manuální ovládání. Otáčky vyskytující se ve výpočtu jsou nastaveny na $1\,000 \text{ min}^{-1}$, tak aby odpovídaly otáčkám případného ovládacího elektromotoru. Pro ten by byla třeba modifikace uchycení. Při manuálním ovládání zatížení v simulátoru jsou vstupní otáčky pochopitelně nižší.



Obr. 4-4 Uložení malé řemenice s ovládacím kolem

4.3.1 Části synchronního řemenového převodu

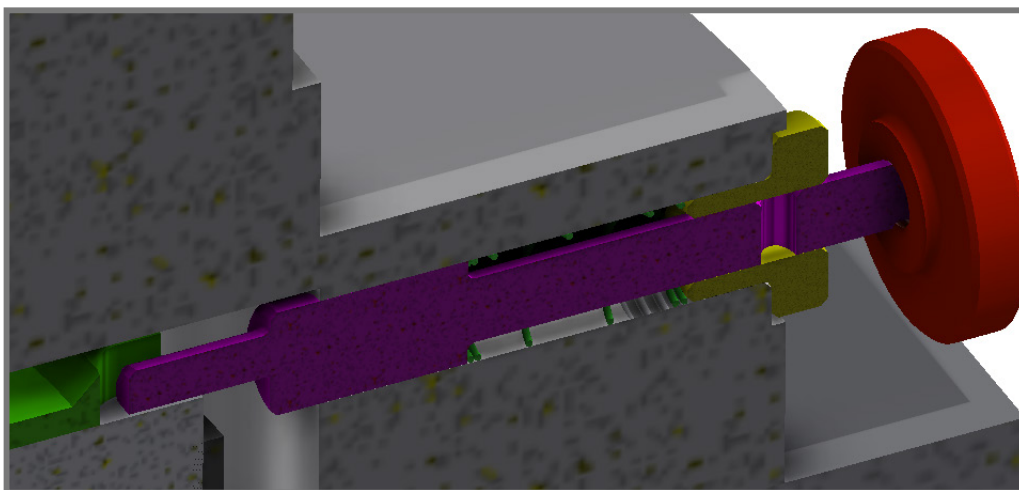
Použitý řemen v převodu od firmy Gates je navrhnout pomocí dodávaného softwaru pro výpočet řemenů Design Flex Pro by Gates. Výstup výpočtu řemenů z tohoto programu je zahrnut v přílohách. Řemenice jsou zakoupené a dodatečně upravené pro potřeby simulátoru. Jsou s profilem MR. Distributor je například TYMA CZ s.r.o.



Obr. 4-5 Malá a velká řemenice s brzdícím kolem

4.3.2 Brzdící mechanismus

Při ručním ovládání může dojít k protočení kuličkového šroubu při odtížení ovládacího kola. To je důsledek nesamosvornosti kuličkového šroubu. Tohle řeší brzdící mechanismus namontovaný na velkou řemenici a upínací desku. Na velké řemenici se nachází brzdící kolo s drážkami, do kterých zapadá kolík - Obr.4-6. Ten je umístěn v upínací desce. Do brzdícího kola je dotlačován pružinou. Při nastavování velikosti zatížení je tedy třeba povytáhnout brzdící kolík a zajistit proti pohybu. K tomu slouží otvor v kolíku do kterého je možno zasunout drát, který dočasně zaaretuje brzdící kolík proti pohybu. Po nastavení patřičné velikosti zatížení stačí odjistit brzdící kolík, který pružina dotlačí do drážky brzdícího kola.



Obr. 4-6 Brzdící mechanismus

4.4 Přenos zatížení mezi vanou a upínací deskou

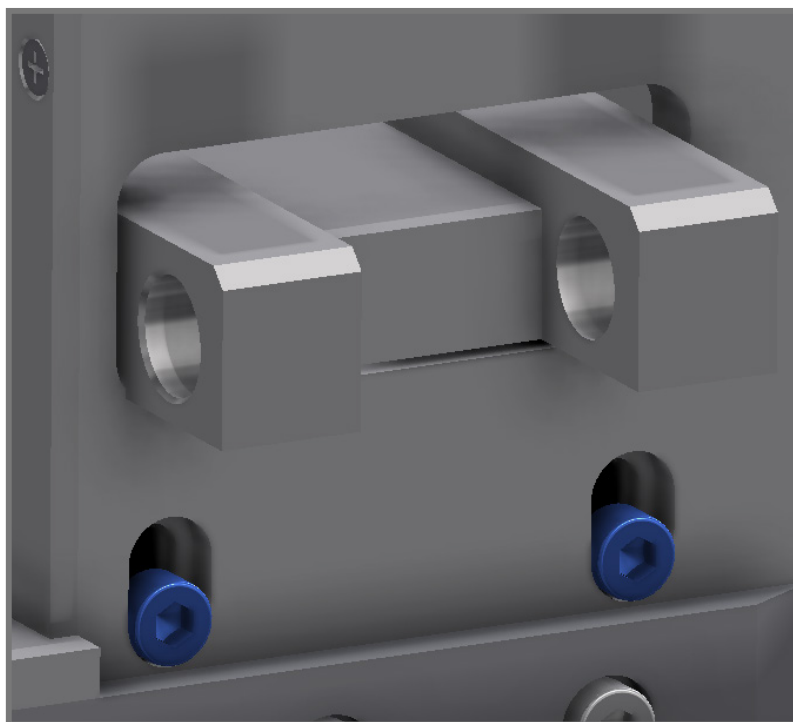
4.4

Vana je na svém místě držena třemi stojinami, levou, pravou a zadní. Dále je ve vaně nasunuto ložisko s kuličkovým šroubem. Boční stojiny přenášejí menší část zatížení. Zadní stojina pak podpírá vanu v místě ložisek, a je určena pro přenos majoritní části zatížení. Stojiny jsou tedy plní funkci nosníků s obdélníkovým profilem. V

bočních stojinách jsou otvory pro táhla, tudíž nejsou schopny nést hlavní část zatížení. Stojiny jsou ke stěnám vany a upínací desky připevněny pomocí šroubů. Pro ty ovšem nejsou ve stojinách vyvrtané díry, ale drážky - Obr.4-7, Obr.4-8. Umístění šroubů do drážek má zabránit přenosu zatížení silovým stykem vyvolaným dotažením šroubů, ale tvarový stykem součástí. Veškeré zatížení je na stojiny přenášeno kontaktem ploch mezi vanou, stojinami a upínací deskou.



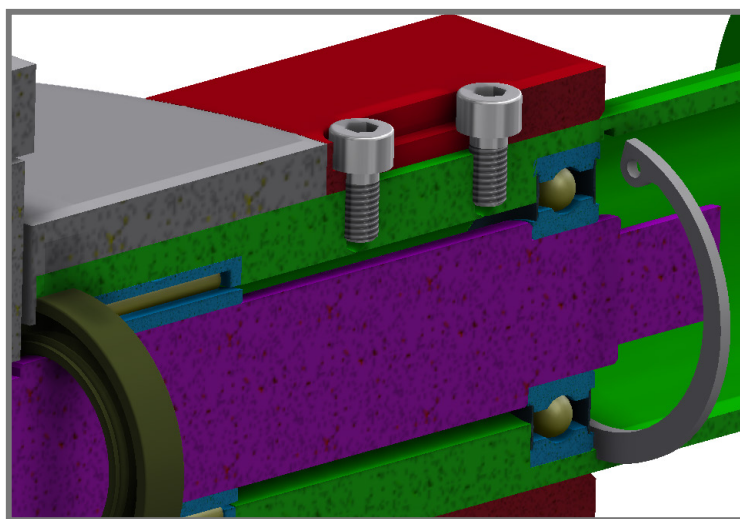
Obr. 4-7 Umístění šroubů



Obr. 4-8 Šrouby na boční stojině

4.5 Uchycení hlavice a jamky

Ve vaně je obroben otvor, který přechází v přírubu připevněnou k vaně čtyřmi šrouby. Do tohoto otvoru je namontováno pomocí dvou šroubů zapadajících do drážky v přírubě pouzdro, které navíc plní funkci příruby pro motor. V pouzdru je zasazeno uložení hřídele nesoucí hlavici. Proti prosakování maziva z prostoru vany je hřídel hlavice zajištěna pomocí břitového těsnění. Celek je pak možné vyjmout uvolněním dvou šroubů a vysunout ven - Obr.4-9. Tahle možnost vysunutí celé hřídele spolu s pouzdem je v návrhu realizována z důvodu požadavku na snadnou výměnu jednotlivých vzorků. Vzorky nemají pouze jeden rozměr, ale každý výrobce má své modifikace. Možností vyjmutí pouzdra s hřídelí je zajištěna snadná vyměnitelnost vzorků s velkou variabilitou průměrů a typů uchycení hlavice.



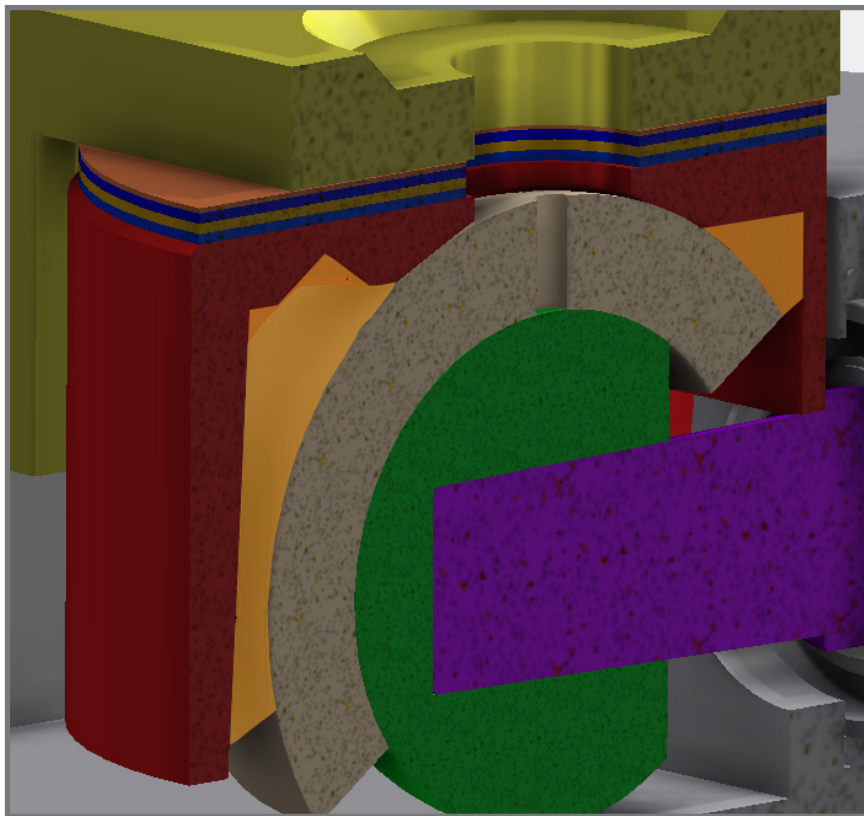
Obr. 4-9 Uložení hřídele nesoucího hlavici

Jamka dosedající na hlavici je uložena na táhlech připojených k pružině pro měření zatížení. Na příčném táhle přes vanu je umístěna miska s otvorem ve dně. To poslouží pro pozorování pomocí mikroskopu. Samotné upevnění jamky je realizováno pomocí pryskyřice. Tuhle metodu použil již dříve Urban a kol. ve svých projektech.

V jamce je tedy pomocí přípravku zafixována poloha jamky, kolem které je nalita pryskyřice. Je vhodné pryskyřici naplnit plnivem, například pilinami, aby se zabránilo vypadnutí bloku pryskyřice s jamkou po jejím ztuhnutí. To je důsledek smrštění pryskyřice po jejím vytuhnutí. Urban a kol. misku na jejím dně opatřil navrtanými otvory pro fixaci vytuhlé pryskyřice vůči pootočení. Na misce je dále zkosení stěn pro snadné vytáhnutí bloku pryskyřice s jamkou.

Zafixování jamky je řešeno pomocí dotlačení jamky do zkosení na dně misky Obr.4-10. Zafixování neprobíhá s dnem misky ve vodorovné poloze, ale s náklonem tak aby se docílilo vyklonění misky. To je dáno konstrukcí simulátoru. Misku je možno zalisovat v požadovaném úhlu podle požadavků měření, například dodržení biologického úhlu mezi zatížením a čelem jamky.

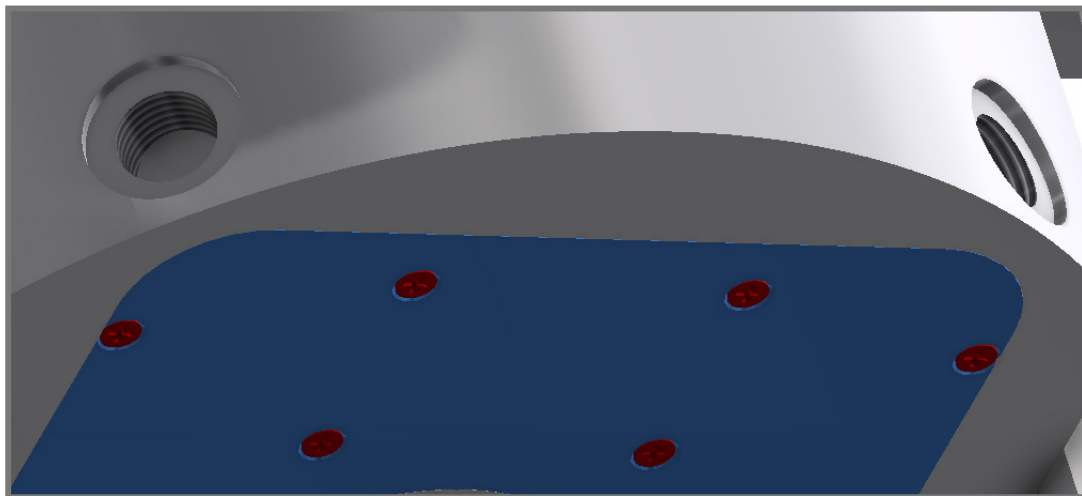
Variabilitnost rozměrů jamek je řešena pomocí více rozměrů. Fixace misky ve správné výšce, tak aby jamka zalisovaná v konkrétní misce dosedla přesně na hlavici je řešena pomocí kroužků, umístěné mezi příčné táhlo a misku.



Obr. 4-10 Jamka dosedající na hlavici v misce podepřená stavěcími kroužky

4.6 Ohřívací okruh

Při simulacích je potřeba mimo jiné dodržovat také teplotu. Požadovanou teplotu zajišťuje ohřívací okruh. Ten se nachází na spodní straně vany. V okruhu proudí médium o vyšší teplotě, které ohřívá přes dno vany BSA. Ohřívací okruh má dvě části. Drážku ve dnu vany a kryt. Kryt zapadá do drážky ve dnu vany, tak aby se co nejvíce zabránilo unikání ohřívacího média. Kryt je upevněn šrouby k vaně. Po celém obvodu je zatěsněn těsnící pastou. Přívod a odvod média je zajištěn otvory s G1/4 závity.



Obr. 4-11 Kryt ohřívacího okruhu na spodní straně vany

5 DISKUZE

Konstrukční návrh simulátoru je zaměřen na výzkum chování tloušťky mazacího filmu. Simulátor je určen pro upnutí na stole, na pojezdové desce. Ta není součástí řešení, ale je použita deska z již existujícího tribometru na VUT FSI Ústavu konstruování. Pro co největší ušetření místa byl namísto páky použit kuličkový šroub. Ovládání je řešeno manuálně s možností modifikace pro připojení krokového motoru.

5.1 Zatěžovací mechanismus

Pro zmenšení rozměrů simulátoru na minimum bylo použito kuličkového šroubu. Ten představuje elegantní řešení pro vyvození na tribometr vysokého zatížení, při malém hnacím kroutícím momentu. Kuličkový šroub byl použit v kombinaci s pružinou pro měření zatížení. Pružina také umožňuje otáčení kuličkového šroubu při zvešování zatížení. Bez ní by použití v této konstrukci bylo obtížně realizovatelné. Pomocí stlačení pružiny je měřena velikost síly, kterou pružina působí přes sadu táhel na zkoumaný kontakt hlavice a jamky. Velikost zatížení je dána vztahem (7), kde vystupuje síla F vyvozená pružinou - axiální síla v kuličkovém šroubu jako funkce tuhosti pružiny R_k a posunutím matice kuličkového šroubu x .

$$F = R_k \cdot x \quad (7)$$

Posunutí matice x se pak dá vyjádřit vztahem (8) v závislosti na počtu otáček kuličkového šroubu n_{2-p} , potažmo velké řemenice a stoupání šroubu P .

$$x = n_{2-p} \cdot P \quad (8)$$

Potom výsledná síla vyvinutá pružinou (10) je závislá na převodovém poměru synchronního řemenového převodu i_{1-2} , tuhosti pružiny R_k , počtu otáček ovládacího kola, potažmo malé řemenice n_{1-p} a stoupání kuličkového šroubu.

$$i_{1-2} = \frac{n_{1-p}}{n_{2-p}} \quad (9)$$

$$F = R_k \cdot \frac{n_{1-p}}{i_{1-2}} \cdot P \quad (10)$$

Měření zatížení pružinou je cenově efektivní v porovnání s tenzometrem. Je zde ovšem potřeba kalibrace pružiny. Tuhost pružiny R_k je tolerovaná hodnota, které se tolerance pohybuje řádově v procentech. Pro přesné měření zatížení je tedy nutné měření, ze kterého se přesně určí tuhost pružiny R_k . Taký je zde problém s brzdícím mechanismem simulátoru, který neumožňuje proporcionálně měnit polohu zafixování kuličkového šroubu, ale fixuje natočení šroubu po krocích. Zde by bylo možné použít k měření tenzometr a použít k fixování kuličkového šroubu brzdu umožňující proporcionálně měnit polohu zafixování. Mohl by se použít typ svěrné brzdy. Zde by bylo nutné navrhnout mechanismus pro její ovládání, kde by bylo třeba dosáhnout malé ovládací síly, ideálně s krátkým ovládacím časem.

5.2 Ovládací mechanismus

Ovládání simulátoru je řešené manuálně pomocí synchronního řemenového převodu. Ten je použit pro nedostatek místa pro ovládání simulátoru, což je důsledek vlastní konstrukce upínání simulátoru na desku posuvu. Řemenový převod umožní posunutí ovládacího kola dostatečně mimo osu kuličkového šroubu, tak aby na hřídel jedné z řemenic bylo možné namontovat dostatečně velké ovládací kolo pro manuální ovládání.

Pro sofistikovanější simulace, kde je třeba měnit velikost zatížení, například při simulaci extenze/flexe podle Gaitova cyklu bude potřeba ovládání elektropohonem. Jako elektropohon může sloužit například krokový motor schopný trvale udržet ovládací kroutící moment. Krokový motor má výhodu v malé pravděpodobnosti jeho poškození. Nehrozí zde možnost přetočení. Pro pohon krokovým motorem bude třeba modifikovat uložení malé řemenice pro připojení příruby pro motor. Takto mohou být simulovány cykly s proměnným zatížením pro flexi/extenzi. Pro simulování abdukce/adukce nebo vnitřní/vnější rotaci.

Práce výsledky studie možného přístupu k řešení simulátoru umělého kyčelního kloubu určeného pro studium tloušťky maziva metodou optické interferometrie. Účelem studie je ukázat teoretické řešení návrhu, vhodné pro jednoduché měření chování maziva mezi konformně zakřivenými povrchy, s možností modifikace pro sofistikovanější měření.

Za účelem návrhu byla provedena studie metod měření, stávajících zařízení a kinematiky vyskytující se v biologickém kloubu. Ta ukázala možnost použití některých částí z již vyrobených tribometrů.

Pro snížení nákladů byla namísto tenzometru použita nástrojová pružina. Ta poskytne dostatečně velký výkon při malých rozměrech. Jako zatěžující člen slouží kuličkový šroub z důvodu malého zástavbového prostoru a malého ovládacího momentu. Pružina nasazená na kuličkový šroub nezpůsobuje žádný ohybový moment na matici. V tomto smyslu byla navržena celá konstrukce. Symetrie celé části konstrukce má za následek menší rozměry konstrukce.

Pro ovládání bylo použito ovládacího kola pro manuální ovládání s synchronním řemenovým převodem na kuličkový šroub. Použití řemenového bylo nutností pro nedostatek místa pod kuličkovým šroubem pro ovládání. Díky malému ovládacímu krouticímu momentu byla zvolena možnost použití manuálního ovládání s možnou pozdější modifikací pro ovládání elektropohonem.

Uchycení jamky je realizováno zalisováním do pryskyřice v misce. Tato miska je uchycena přes systém táhel na pružinu. Tento systém táhel zajišťuje přenos zatížení z kuličkového šroubu a pružiny na jamku umělého kyčelního kloubu. Jamka dosedá na hlavici poháněnou elektromotorem. V případě potřeby je miska podložena stavíci kroužky, tak aby dosedala na otáčející se hlavici (umělou hlavu femuru). Takto řešené uchycení jamky umožňuje zaměnitelnost rozměrů jamky.

Zaměnitelnost hlavice je umožněna výměnou pouzdra obsahujícího ložiska spolu se zatěsněním hřídele. Pro zaměnitelnost hlavice je třeba více hřídelí, pro každý rozměr hlavice jedna, tak aby byla zajištěna stejná poloha středu křivosti hlavice vůči středu křivosti jamky.

Využitím tohoto řešení simulátoru je možné měřit tloušťku mazacího filmu v kontaktu konformně zakřivených povrchů, se zjednodušenou kinematikou pohybu. Simulátor představuje model umělého kyčelního kloubu, s možností různého náklonu jamky vůči hlavici a se zjednodušenou kinematikou omezující se na flexi/extenzi kyčelního kloubu.

Práce splňuje všechny cíle potřebné pro návrh simulátoru, navrhuje konstrukci simulátoru pro měření tloušťky maziva v umělém kyčelním kloubu.

BIBLIOGRAFIE

- [1] TECHPARK, o. z. *Tribotechnika* [online]. Žilina: TechPark, ©2008 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk>
- [2] T. MILLER. Imaging of hip arthroplasty. *European journal of radiology*. 2012, roč. 81, č. 12, s. 3802-3812. ISSN 0720-048x. Dostupné z: www.sciencedirect.com/science/journal/0720048X
- [3] HAYNES, D.R., T.N. CROTTI a H. ZREIQAT. Regulation of osteoclast activity in peri-implant tissues. *Biomaterials*. 2004, roč. 25, č. 20, s. 4877-4885. ISSN 01429612. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2004.01.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142961204000043>
- [4] DAVIM, J. *Biotribology*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2010, x, 202 p. ISBN 978-184-8212-756.
- [5] BOWSHER, J., J. DONALDSON, A. WANG, A. ESSNER a I. CLARKE. *Low running-in wear for large diameter metal-on-metal hip bearings*. 53rd Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society. San Diego, 2007.
- [6] BROCKETT, C.I., P HARPER, S.. WILLIAMS, G. ISAAC, R. DWYER-JOYCE, Z. JIN a J. FISHER. *Direct measurement of lubrication in large diameter metal-on-metal hip implants*. 53rd Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society. San Diego, 2007
- [7] DOWSON, D., C.m. MCNIE a A.a.j. GOLDSMITH. *Direct experimental evidence of lubrication in metal-on-metal total hip replacment tested in joint simulator: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H*. 2000, p.75-86.
- [8] ISO 14242-1:2012(E). *Implants for surgery - Wear of total hipjoint prostheses: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and corresponding environmental conditions for test*. 2.vyd. Geneva: ISO copyright office, 2012.
- [9] ISO 14242-2:2000(E). *Implants for surgery - Wear of total hip-joint prostheses: Methods of measurement*. Geneva: ISO copyright office, 2000.
- [10] ISO 14242-3:2009(E). *Implants for surgery - Wear of total hipjoint prostheses: Loading and displacement parameters for orbital bearing type wear testing machines and corresponding environmental conditions for test*. Geneva: ISO copyright office, 2009.
- [11] MATTEI, L., F. DI PUCCIO, B. PICCIGALLO a E. CIULLI. Lubrication and wear modelling of artificial hip joints: A review. *Tribology International*. 2011, roč. 44, č. 5, s. 532-549. ISSN 0301679x. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.06.010. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X10001647>

- [12] BERGMANN, G., F. GRAICHEN a A. ROHLMANN. Hip joint loading during walking and running, measured in two patients. *Journal of Biomechanics*. 1993, roč. 26, č. 8, s. 969-990. ISSN 00219290. DOI: 10.1016/0021-9290(93)90058-M. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002192909390058M>
- [13] HARTL, M.; KRUPKA, I.; LIŠKA, M. Differential colorimetry: tool for evaluation of chromatic interference patterns. *Optical Engineering*. 1997, vol. 36, no. 9, s. 2384-2391. ISSN 0091-3286.
- [14] HIWIN S.R.O. *Kuličkové šrouby a příslušenství*. Brno, 2009. Dostupné z: www.hiwin.cz/cs/kulickove-srouby-a-prislusenstvi/file.html?id=1287
- [15] Nástrojové pružiny. *Henlich* [online]. ©2013 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://www.hennlich.cz/produkty/pruziny-nastrojove-pruziny-248.html>
- [16] ORTEGA-SÁENZ, J.A., M.A.L. HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, A. PÉREZ-UNZUETA a R. MERCADO-SOLIS. Development of a hip wear simulation rig including micro-separation. *Wear*. 2007, vol. 263, 7-12, s. 1527-1532. DOI: 10.1016/j.wear.2007.01.097. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164807004097>
- [17] VRBKA, M., T. NAVRAT, I. KRUPKA, M. HARTL, P. SPERKA a J. GALLO. Study of film formation in bovine serum lubricated contacts under rolling/sliding conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2013-04-18, vol. 227, issue 5, s. 459-475. DOI: 10.1177/1350650112471000.

SEZNAM ZKRATEK A POUŽITÝCH VELIČIN

BSA		Hovězí sérum
CT		Počítačová tomografie
d_k	m	Průměr kuličkového šroubu
EHL		Elastohydrodynamické mazání
F	N	Provozní axiální síla v kuličkovém šroubu
F_k	N	Maximální dovolená teoretická síla
F_{kmax}	N	Maximální dovolená provozní síla
i_{1-2}	1	Převodový poměr synchronního řemenového převodu
k_k	1	Koeficient závislosti na uložení
l_k	m	Nepodepřená délka kuličkového šroubu
M_k	N·m	Hnací krouticí moment
M_{ov}	N·m	Ovládací krouticí moment
n_l	s ⁻¹	Otáčky malé řemenice - hnací otáčky
n_{l-p}	1	Počet otáček malé řemenice - ovládacího kola
n_2	s ⁻¹	Otáčky velké řemenice - kuličkového šroubu
n_{2-p}	1	Počet otáček velké řemenice - kuličkového šroubu
P	m	Stoupání kuličkového šroubu
P_s	W	Skutečný potřebný výkon
P_t	W	Teoretický potřebný výkon
PE		Polyethylen
R_k	N·m ⁻¹	Tuhost pružiny
RTG		Roentgenovo záření, rentgen
x	m	Stlačení pružiny - posunutí matice kuličkového šroubu
η	1	Účinnost kuličkového šroubu
η_r	1	Účinnost řemenového převodu

SEZNAM OBRÁZKŮ

- 1-1 Schema totální kloubní náhrady a náhrady kontaktních ploch [11]
- 1-2 Schema styku vrstev kovových povrchů [1] 1-Základní materiál, 2- vrstva zpevněná plastickou deformací, 3- vrstva oxidů, 4- vrstva produktů chemických reakcí, 5- adsorbovaná vrstva polárních molekul maziva, 6- vrstva maziva
- 1-3 Působení abrazivních částic na opotřebovávaný povrch
- 1-4 Různé materiály a typy provedení umělých kyčelních kloubů, nalevo kovová hlava i jamka, (Metal-Metal) provedení, napravo provedení keramické. Jednotlivé kloubní náhrady jsou od různých výrobců proto je v obou případech jiná geometrie.
- 1-5 Kinematika Gaitova cyklu. [8] X- procentuální čas cyklu, Y- úhel natočení hlavy femuru ve stupních, AB- abdukce, AD- adukce, E- extense, F- flexe, IR- rotace vnitřní, OR- rotace vnější.
- 1-6 Zatížení dle Gaitova cyklu. [8] X- procentuální čas cyklu, Y- velikost zatížení hlavy femuru,
- 1-7 RTG snímky kyčelních kloubů. Jsou zde naznačené osy ukazující variabilitnost konstrukcí. U těchto snímků jsou úhly zleva 148, 138, 138. Každý kyčelní kloub je od jiného výrobce, což je patrné z jejich tvaru.
- 1-8 Simulátor pro měření na vzorku hlavy acetabula (průměr 30mm) a kloubní jamky [16]. Názorně ukazuje aplikaci pneumatického systému. Springs system- systém pružin, Load cell- siloměr, Pneumatic muscle- pneumatický sval, Proportional valve- proporcionální ventil
- 1-9 Schema simulátoru vyvozujícím zatížení pomocí páky. Test chamber and system temperature- Vana s testovaným vzorkem a systémem ohřevu, Load cell- siloměr, X,Y,Z axis- osy servomotorů.
- 1-10 Reálná podoba simulátoru podle schématu Obr 1-9
- 1-11 Schema metody optické interferometrie tak jak ji publikoval Hartl a kol. [17] High-speed CMOS digital camera- vysokorychlostní kamera s CMOS snímačem, Microscope- mikroskop, Chromatic interferogram- interferogram, Film thickness- tloušťka mazacího filmu.
- 3-1 První konstrukční řešení - varianta s portálem, 1- Kuličkový šroub, 2- Vodící tyče, 3- Nosníky, 4- Vana, 5- Most portálu, 6- U-profil, 7- Boční profil
- 3-2 Druhé konstrukční řešení
- 3-3 Druhé konstrukční řešení, 1- Ukazatel zatížení (stlačení pružiny), 2- Matice kuličkového šroubu, 3- Pružina, 4-Kuličkový šroub
- 4-1 Kuličkový šroub
- 4-2 Uchycení kuličkového šroubu v upínací desce [14] Nalevo pohled na model simulátoru, Doporučené uchycení dle výrobce.

- 4-3 Pružina nasunutá na kuličkovém šroubu v pracovní poloze
- 4-4 Uložení malé řemenice s ovládacím kolem
- 4-5 Malá a velká řemenice s brzdícím kolem
- 4-6 Brzdící mechanismus
- 4-7 Umístění šroubů
- 4-8 Šrouby na boční stojině
- 4-9 Uložení hřídele nesoucího hlavici
- 4-10 Jamka dosedající na hlavici v misce podepřená stavěcími kroužky
- 4-11 Kryt ohřívacího okruhu na spodní straně vany

SEZNAM PŘÍLOH

1. Výstup výpočtu řemenového převodu z program Design Flex Pro by Gates
2. Výkres sestavení - 13-SIM-A1-00
3. Výkres součásti - 13-SIM-A1-01
4. Výkres součásti - 13-SIM-A1-02
5. Výkres součásti - 13-SIM-A3-03
6. Výkres součásti - 13-SIM-A3-04
7. Výkres součásti - 13-SIM-A3-05
8. Výkres součásti - 13-SIM-A3-06
9. Výkres součásti - 13-SIM-A3-07
10. Výkres součásti - 13-SIM-A3-08
11. Výkres součásti - 13-SIM-A3-09
12. Výkres součásti - 13-SIM-A3-10
13. Výkres součásti - 13-SIM-A3-11
14. Výkres součásti - 13-SIM-A3-12
15. Výkres součásti - 13-SIM-A3-13
16. Výkres součásti - 13-SIM-A4-14
17. Výkres součásti - 13-SIM-A4-15
18. Výkres součásti - 13-SIM-A4-16
19. Výkres součásti - 13-SIM-A4-17
20. Výkres součásti - 13-SIM-A4-18
21. Výkres součásti - 13-SIM-A4-19
22. Výkres součásti - 13-SIM-A4-20
23. Výkres součásti - 13-SIM-A4-21
24. Výkres součásti - 13-SIM-A4-22
25. Výkres součásti - 13-SIM-A4-23
26. Výkres součásti - 13-SIM-A4-24
27. Výkres součásti - 13-SIM-A4-25
28. Výkres součásti - 13-SIM-A4-26
29. Výkres součásti - 13-SIM-A4-27
30. Výkres součásti - 13-SIM-A4-28
31. Výkres součásti - 13-SIM-A4-29
32. Výkres součásti - 13-SIM-A4-30

- 33. Výkres součásti - 13-SIM-A4-31
- 34. Výkres součásti - 13-SIM-A4-32
- 35. Výkres součásti - 13-SIM-A4-33
- 36. Výkres součásti - 13-SIM-A4-34
- 37. Výkres součásti - 13-SIM-A4-35
- 38. Seznam položek - 13-SIM-A1-00



Návrh řemenového převodu - Detaily pohonu

Design Flex® Pro by the Gates Corporation

Navrženo pro:

Zajišťuje: Kryštof Dockal
Brno University of Technology
Cítov 10
Brodek u Prerova, 75103
Česká republika
krystof.dockal@gmail.com
+420728881196 Telefon

Aplikace: **Konstrukce #1**

VSTUP

Info. o pohonu				Hnací	Hnaný
Známy řemen:	PowerGrip GT3 - 500-5MGT3	Známa velikost:	24 Zuby	60 Zuby	
Poměr otáček:	2,50 Do pomala Motor: 1000,0 Převodovka: 2,00	Otáčky za minutu:	500,0	200,0	
Výkon motoru:	370 W, Účinnost: 92,00 %	Maximální obvodová rychlost:	33 m/s	33 m/s	
Převodovka:	325,6 W, Účinnost: 88,00 %				
Provozní faktor:	1,6				
Konstr. výkon:	521 W	Kontrolovaná pouzdra:	Taper-Lock		
Středová vzdálenost:	142,1 mm	Kontrolované řemeny:	PowerGrip GT3		
					Electric Motor

ZVOLENÝ POHON

Typ řemene:	PowerGrip GT3 - 5M	Díl č.:	500-5MGT3-15	Hnací	60-5MR-15
Poměr otáček:	2,50 Do pomala	Produkt č.:	9400-55218	24-5MR-15	60-5MR-15
Rychlost hnaná:	200,0	Horní šířka:	--	30,00 mm	30,00 mm
Nominální výkon:	561 W	Hmotnost:	31 g	--	--
Na hřídel:	472 N	Obv. rychl. m/s:	1,0 m/s	1,0 m/s	1,0 m/s
Středová vzdálenost:	142,1 mm	Otáčky za minutu:	120,0	500,0	200,0
Instalační tolerance:	122,0 mm až 142,9 mm	Pouzdro položka č.:	--	Minimální díra	Minimální díra
		Díra:	--	--	--
		Roztečný průměr:	--	38,20 mm	95,49 mm

NAPĚTÍ

	Nový řemen	Použitý řemen	Pokud plánujete demontáž použitých řemenů, změřte a zaznamenejte napětí před demontáží a napněte řemen na původní napětí.
Průhyb na drážku/žebro:	2,78 mm	2,78 mm	
Síla v průhybu na drážku/žebro:	22 až 24 N	17 až 18 N	
Sonic - měřič napětí			
Frekvence řemene:	218 až 228 Hz	182 až 195 Hz	
Nastavení Sonicu:	Hmotnost: 4,1g/m, Šířka: 15mm/#R, Rozpětí: 139mm		

POZNÁMKY

- Délka řemene byla zadána uživatelem.
- Motážní přesnost vychází ze zadaného rozsahu osových vzdáleností.
- Hnací řemenice musí mít požadovaný průměr díry. Počítejte s delší dobou výroby..
- Hnací řemenice; hřídel by měla odpovídat volnému uložení H8. Hřídel musí vniknout na 100%.
- Hnaná řemenice musí mít nestandardní průměr díry. Počítejte s delší dodací lhůtou.
- Průměr díry hnané řemenice; hřídel by měla odpovídat volnému uložení Class LC2. Hřídel musí vniknout na 100%.
- V návrzích převodu z Design Flex Pro je počítáno pouze s Gates produkty a nejsou použitelné na produkty jiných výrobců.
- Výrobky nejsou určeny k použití na strojích, kde selhání výrobku může vést k ublížení na zdraví nebo k smrti. Toto zahrnuje použití na pohonech leteckých vrtulí a rotoru, nebo souvisejících pomocných pohonech.