



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

SLIT-FLOW REOMETR PRO MAGNETICKÉ I NEMAGNETICKÉ KAPALINY

SLIT FLOW RHEOMETER FOR MAGNETIC AND NON-MAGNETIC FLUIDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Železník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Roupec, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Tomáš Železník**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Roupec, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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 diplomové práce:

Slit–flow reometr pro magnetické i nemagnetické kapaliny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výzkumný tým Diagnostiky před lety přišel s revolučním způsobem měření magnetoreologických kapalin (MRF) a to za podmínek blížících se podmínkám v reálných zařízeních. Způsob měření MRF a jeho provedení pomocí speciálního reometru je chráněno dvěma patenty. V současné době je potřeba již ověřenou technologii dopracovat do funkčního vzorku, který bude splňovat veškeré nároky na uživatelskou přívětivost obsluhy reometru.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: GAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je dokončit konstrukční vývoj reometru pro měření magnetických i nemagnetických kapalin za podmínek vysokých smykových spádů a teploty v rozsahu od 20 do 80 °C.

Dílčí cíle diplomové práce:

- úpravou konstrukce zajistit vysokou opakovatelnost měření, snadné sestavení reometru a snadnou instalaci do zařízení inicializující protlačení vzorku,
- úpravou konstrukce zajistit rychlou a uživatelsky příjemnou výměnu vzorku,
- úprava měřicího řetězce, zejména způsobu měření polohy plovoucího pístu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

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

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

MALKIN, A. J. a A. I. ISAYEV. Rheology - Concepts, Methods, and Applications. 2nd ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2012. ISBN 978-1-895198-49-2.

GONCALVES, F. D., M. AHMADIAN a J. D. CARLSON. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. Smart Materials and Structures. 2006, roč. 15, č. 1, s. 75–85. ISSN 0964-1726.

MAZŮREK, I., J. ROUPEC, M. KLAPKA a Z. STRECKER. Load and rheometric unit for the test of magnetorheological fluid. Meccanica. 2013, 48(3), 631-641. ISSN 0025-6455.

ROUPEC, J., I. MAZŮREK, Z. STRECKER a M. KLAPKA. The behavior of the MR fluid during durability test. Journal of Physics: Conference Series. 2013, roč. 412, č. 1, s. 12024. ISSN 1742-6588.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

V rámci téhle diplomové práce se vyvinula, vyrobila a otestovala čtvrtá evoluce slit-flow reometru spolu s dalšími nezbytnými součástmi, jako např. jeho držák, rám pohonu a potřebné přípravky. Tento reometr dokáže měřit reologické vlastnosti magnetických i nemagnetických kapalin při velmi vysokých smykových spádech, kterých reometry na trhu nedosahují. Je konstruován na maximální tlak ve válci 200 bar a maximální zatížení celé konstrukce 15 kN.

Vyvinuté zařízení zlepšuje uživatelskou přívětivost, urychluje výměnu vzorku kapaliny a rozšiřuje možnosti výzkumu díky velkému prostoru k dodatečným úpravám podle potřeby. Je možné použít různé délky štěrbin a díky výměnným vložkám i měnit její parametry (drsnot stěn, materiál stěn, tloušťka štěrbin).

Součástí práce je i odvození potřebných vztahů pro naplánování kalibračních měření, jehož cílem je získat závislost místních tlakových ztrát na Reynoldsově čísle pro danou štěrbinu.

KLÍČOVÁ SLOVA

slit-flow reometr, reologie, reologické vlastnosti, magnetoreologická kapalina, vysoký smykový spád

ABSTRACT

In this thesis was designed, manufactured and tested the fourth evolution of a slit-flow rheometer with another necessary parts, eg. rheometer's holder, drive frame and important jig tools. The rheometer is able to measure rheological properties of magnetic and non-magnetic fluids at very high shear rates, which commercial rheometers can not reach. It is designed for 200 bar pressure and maximum load 15 kN.

The construction of the slit-flow rheometer with it's holder and drive frame improves user friendliness, accelerates change of the fluid sample and expands research opportunities thanks to a big space for additional adjustments. It is possible to use different length of the slit and thanks to a changeable inserts it is possible to change parameters of the slit (roughness of the walls, wall material, thickness of the slit).

A part of this thesis was focused on illation of necessary equations for planning calibration measurements. Aim of these measurements is to obtain minor pressure losses dependence on Reynolds number for specific slit.

KEYWORDS

slit-flow rheometer, rheology, rheology properties, magnetorheological fluid, high shear rate

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽELEZNÍK, Tomáš. *Slit-flow reometr pro magnetické i nemagnetické kapaliny*. Brno, 2020, 146 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Roupec, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Jakobovi Roupcevi, Ph.D. za vedení téhle práce a za všechny cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalovi Kubíkovi, Ph.D. za ochotu a za čas, který mi věnoval v době nepřítomnosti vedoucího práce. Nakonec chci poděkovat panu Zdeňkovi Růžičkovi ze školní dílny za ochotu a za konzultace výrobních postupů u některých součástí.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Jakuba Roupce, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Reometry	15
2.1.1	Obecně o reometrech	15
2.1.2	Rotační reometry	15
2.1.3	Slit-flow reometry ve světě	18
2.1.4	Reometry vyvinuté na Ústavu konstruování	21
2.2	Vyhodnocení tokových křivek	29
2.2.1	Newtonské kapaliny	30
2.2.2	Ne-newtonské kapaliny	30
2.3	Průtok kapaliny štěrbinou	34
2.3.1	Chování nemagnetické kapaliny	35
2.3.2	Vliv drsnosti stěn štěrbin	42
2.3.3	Délka aktivní zóny při měření MR kapalin	44
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	45
3.1	Analýza problému	45
3.2	Analýza a zhodnocení rešerše	46
3.2.1	Reometry	46
3.2.2	Průtok kapaliny štěrbinou	51
3.2.3	Kapaliny	54
3.3	Cíl práce	55
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	56
4.1	Postup řešení	56
4.2	Reometr	57
4.2.1	Magnetický obvod a nemagnetické tělo se štěrbinou	58
4.2.2	Vtoky	64
4.2.3	Umístění snímačů a šroubů reometru	67
4.2.4	Válec	68
4.2.5	Temperační obvod	70
4.3	Držák reometru a rám pohonu	72
4.3.1	Držák reometru	74

4.3.2	Rám pohonu reometru	80
4.4	Měření polohy plovoucího pístu	86
5	KONTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	90
5.1	Určení maximálního provozního zatížení	90
5.2	Geometrická závislost mezi rámem pohonu reometru, reometrem a jeho držákem	91
5.3	Reometr	93
5.3.1	Magnetický obvod a nemagnetické tělo se štěrbinou	94
5.3.2	Vtoky	102
5.3.3	Příruba, válec a temperační obvod reometru	106
5.4	Držák reometru a rám pohonu	111
5.4.1	Držák reometru	112
5.4.2	Rám pohonu reometru	124
5.5	Ostatní části konstrukce reometru	139
5.5.1	Držák snímače polohy plovoucího pístu	139
5.5.2	Spojka siloměru s hydraulickým pulsátorem Inova	141
5.6	Přípravky k odvzdušňování reometru	142
5.6.1	Přípravek pro držení plovoucího pístu	144
5.6.2	Přípravek na protlačení kapaliny	144
5.7	Kalibrace reometru	148
6	DISKUZE	150
6.1	Výměna vzorku kapaliny, skládání a odvzdušňování reometru	151
6.2	Možnosti reometru	153
6.3	Magnetický obvod	155
6.4	Montáž na rám hydraulického pulsátoru Inova	156
6.5	Měření	159
6.5.1	Naměřená data	160
7	ZÁVĚR	166
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	168
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	171
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	176
11	SEZNAM TABULEK	184

12	SEZNAM PŘÍLOH	185
12.1	Příloha 1 – Magnetický obvod reometru	185
12.1.1	Příloha 1.1 – Zajištění distancí	185
12.1.2	Příloha 1.2 – Namáhání závitových tyčí během měření	186
12.1.3	Příloha 1.3 – Síla namáhající vložky ve směru proudění kapaliny	190
12.1.4	Příloha 1.4 – Varianta zajištění distancí pomocí kolíků	191
12.2	Příloha 2 – Korigovaná mez únavy válce reometru	192
12.3	Příloha 3 – Držák reometru	193
12.3.1	Příloha 3.1 – Šrouby svěrného spoje	193
12.3.2	Příloha 3.2 – Šrouby jisticí reometr v držáku	199
12.3.3	Příloha 3.3 – Korigovaná mez únavy materiálu držáku	202
12.3.4	Příloha 3.4 – Korigovaná mez únavy materiálu výpalku	203
12.3.5	Příloha 3.5 – Napětí v těle držáku při protlačení směrem nahoru	204
12.4	Příloha 4 – Rám pohonu reometru	205
12.4.1	Příloha 4.1 – Návrh tyče s ohledem na mezní stav vzpěrné stability	206
12.4.2	Příloha 4.2 – Výpočet šroubů svěrného spoje rámu pohonu	208
12.4.3	Příloha 4.3 – Korigovaná mez únavy materiálu profilu	211
12.5	Příloha 5 – Výpočet spojky siloměru s Inovou	212
12.5.1	Příloha 5.1 – Korigovaná mez únavy materiálu	212
12.5.2	Příloha 5.2 – Utahovací moment závitu M16x2	213
12.5.3	Příloha 5.3 – Napětí v nebezpečném průřezu	214
12.5.4	Příloha 5.4 – Kontrola závitu M20x1,5	217
12.6	Příloha 6 – Výpočet tlakových ztrát ve šterbině	217
12.6.1	Příloha 6.1 – Oblast vyvinutého rychlostního profilu (mezi body 3 a 4)	218
12.6.2	Příloha 6.2 – Oblast tvorby rychlostního profilu (mezi body 2 a 3)	221
12.6.3	Příloha 6.3 – Rovnice pro vyhodnocení kalibračních měření	226
12.7	Externí přílohy	228

1 ÚVOD

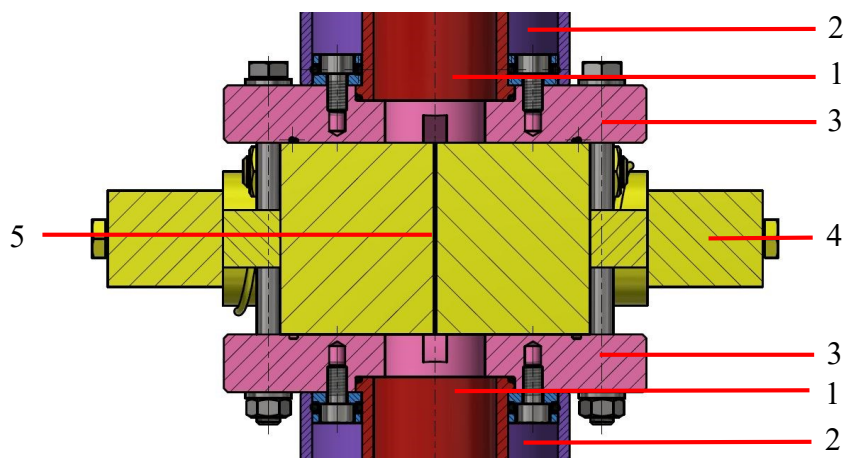
Magnetoreologická (MR) kapalina je speciální druh kapaliny, který při vystavení magnetickému poli mění své reologické vlastnosti. Její využití spočívá především v MR tlumičích, kde se tento jev využívá pro řízení tlumící síly. Skládá se z feromagnetických částic, nosné kapaliny a přísad.

Při návrhu MR tlumičů se v současné době používá, stejně jako pro návrh jiného hydraulického zařízení, počítačová simulace proudění – Computational Fluid Dynamics (CFD). Na základě výsledků z těchto simulací se následně navrhuje geometrie hydraulické části. Je proto nutné, aby se výsledky co nejvíce blížily realitě. Jako vstupní parametry do simulace se musí zadat skutečné vlastnosti dané kapaliny.

Tyto vlastnosti je nutné nejprve naměřit. Měřením se zabývá výzkumný tým Diagnostiky na Ústavu konstruování, který před lety narazil na problém. Měření totiž musí probíhat za podmínek blízkých těm skutečným v daném zařízení, u MR tlumiče je jednou z hlavních veličin smykový spád až 10^6 s^{-1} [1]. Komerčně dostupné reometry schopné měřit MR kapaliny nedosahují této potřebné velikosti smykového spádu [1].

Výzkumný tým proto přišel s revolučním způsobem měření MR kapalin, který umožňuje měřit při hodnotách smykovém spádu srovnatelného s hodnotami v MR tlumičích. Toto řešení reometru, včetně způsobu analýzy dat, je chráněno dvěma patenty a v současnosti je tato technologie již ověřená na třetí evoluci slit-flow reometru – viz Obrázek 1-1. Reometr umožňuje měřit až do teploty $80 \text{ }^\circ\text{C}$ a také umožňuje měřit jakoukoliv nemagnetickou kapalinu.

Cílem této práce je kompletně vyvinout čtvrtou evoluci reometru. Důraz je kladen na dostatečnou uživatelskou přívětivost, snadnou a rychlou výměnu vzorku a zajištění vysoké opakovatelnosti měření. Autor práce se nejprve zabývá vývojem, poté výrobou a nakonec testováním. Motivací autora je zájem o problematiku a také chuť učit se novým věcem.



Obrázek 1-1 Současný slit-flow reometr; 1 - válec s MR kapalinou, kterou protlačí plovoucí písty, 2 - temperační okruh, 3 - příruby, 4 – magnetické tělo s cívkou, 5 - štěrbyna

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Reometry

2.1.1 Obecně o reometrech

Reometry jsou laboratorní zařízení určená k měření reologických vlastností kapalin. Používají se pro ty kapaliny, jejichž chování se nedá popsat jenom hodnotou viskozity. Tyto kapaliny se nazývají ne-newtonské a jejich vlastnosti závisí také na provozních podmínkách. Speciálním případem jsou tzv. magnetoreologické (MR) kapaliny, které prudce mění své reologické vlastnosti v závislosti na přítomnosti magnetického pole.

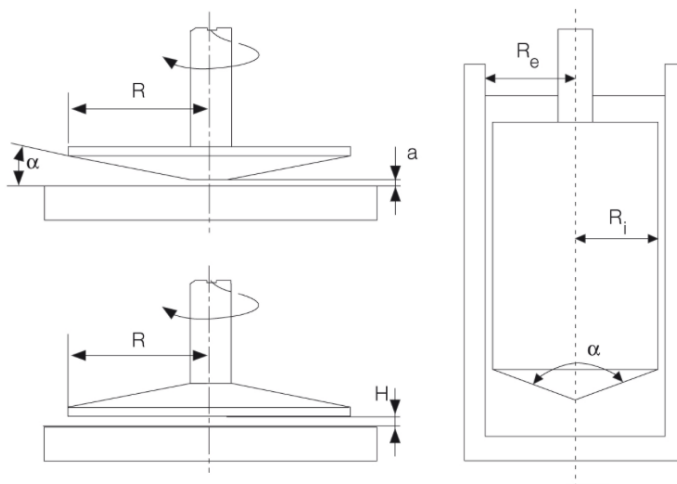
Základní ukazatele vlastností kapalin jsou viskozitní a tokové křivky [1]. Toková křivka je závislost smykového napětí τ na smykovém spádu $\dot{\gamma}$, viskozitní křivka je závislost viskozity η na smykovém spádu $\dot{\gamma}$. Na základě těchto křivek se kapaliny dělí do mnoha kategorií. Podrobněji je tato problematika rozebrána v kapitole 2.2.

Na trhu jsou k dostání pouze reometry rotačního typu. Jejich konstrukce je modulární, díky tomu je možné měřit jak magnetoreologické (MR), tak i nemagnetické kapaliny na stejném zařízení. Tento přístup aplikují všichni hlavní výrobci, neexistuje komerčně nabízené zařízení určené pouze pro MR kapaliny. Proto byla rešerše cílena pouze na reometry, které dokáží díky modulárnosti měřit MR kapaliny v přítomnosti magnetického pole.

2.1.2 Rotační reometry

Rotační reometry jsou zařízení, která k měření reologických vlastností využívají rotačního pohybu měřící geometrie. Princip činnosti spočívá v měření odporového kroutícího momentu na rotoru.

Hlavní částí rotačních reometrů je měřící geometrie, která se skládá ze dvou sousedících válcových prvků, z nichž jeden je pevný a druhý nejčastěji rotuje. Mezi nimi je umístěn vzorek měřené kapaliny. Provedení měřící geometrie je specifikováno normami ISO 3219 a DIN 53090, které v současnosti povolují tři druhy – viz Obrázek 2-1.



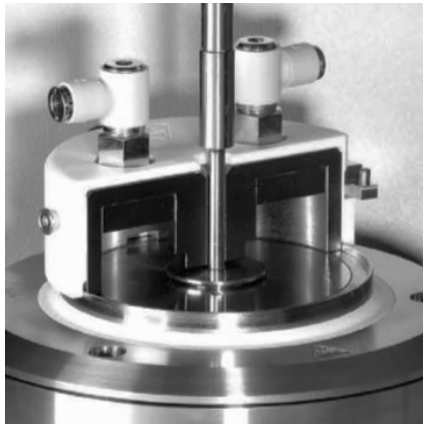
Obrázek 2-1 Měřící geometrie; vlevo nahoře: typ kužel – deska, vlevo dole: typ disk – deska, vpravo: typ válec - válec [2]

Více druhů měřících geometrií má své opodstatnění, protože se hodí pro různé kapaliny. Například pro velmi málo viskózní kapaliny je kvůli nízkým smykovým napětím v kapalině nejvhodnější geometrie válec – válec díky větší kontaktní ploše. Pro měření MR kapalin v aktivovaném stavu je vhodná pouze geometrie typu disk – deska. Je totiž nutné mít v celém průřezu MR kapaliny konstantní hodnotu magnetického pole, což jiné typy geometrie nespĺňují.

Rotační reometry umožňují měření v různých režimech [2]. Je možné například určit, jestli má měřící geometrie rotovat nebo oscilovat. Dále je možné určit dva způsoby řízení zkoušky. V prvním se zkouška řídí na základě velikosti smykového spádu nebo rychlosti otáčení. Tím se zohledňují aplikace, které jsou závislé na rychlosti proudění, typicky například stříkání barvy. Druhý způsob zase umožňuje nastavit velikost poháněného kroutícího momentu. To je výhodné pro aplikace závislé na hnací síle, typicky například síla potřebná k zahájení čerpání materiálu.

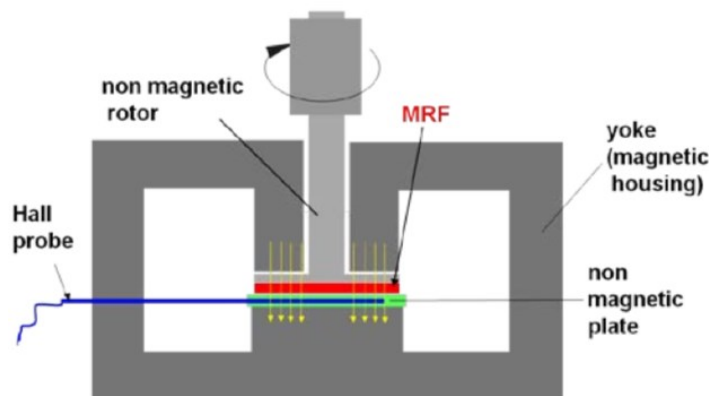
Anton Paar

Firma Anton Paar GmbH nabízí hned dvě řešení reometru pro MR kapaliny [3]. Obě varianty obsahují stejné základní prvky. Pro měření magnetického pole se využívá Hallova sonda. Díky ní není nutná žádná kalibrace v důsledku změny permeability vzorku. Dále je možné s využitím Peltiéroveho článku měřit při různých teplotách. K vedení magnetického pole slouží dvoudílný magnetický kryt, který zajišťuje homogenní magnetické pole orientované kolmo na měřící mezeru – viz Obrázek 2-2.



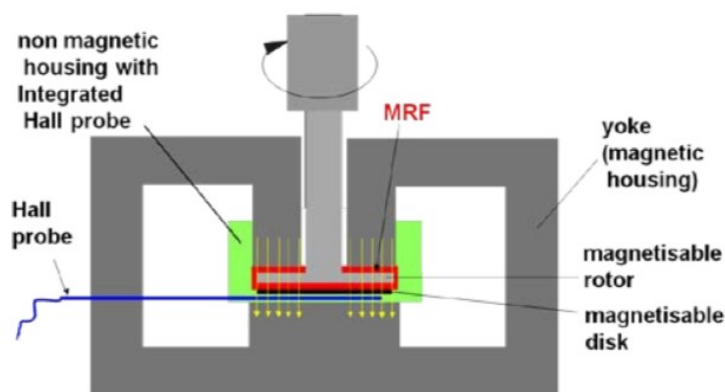
Obrázek 2-2 Řez zařízením vytvářejícím magnetické pole [3]

Obrázek 2-3 schematicky znázorňuje první variantu. Jedná se o měření při jednostranném kontaktu MR kapaliny s diskem na rotoru. Toto řešení ale není vhodné pro měření MR kapalin vykazující silnou odezvu na magnetické pole. Mohou totiž vzniknout poměrně velké normálové síly, které mohou vést až k přetížení vzduchového ložiska rotoru. To zbytečně omezuje použitelnou velikost magnetické indukce na maximální hodnotu 1 T. Při vyšších smykových spádech než 10^2 s^{-1} navíc dochází k odstředění vzorku kapaliny z měřicí mezery.



Obrázek 2-3 První varianta zařízení pro MR kapaliny - Anton Paar [3]

Problém odstředování vzorku vyřešil Anton Paar novým konceptem nazvaným TwinGap™, který si následně nechal patentovat. Jedná se o nejpokročilejší reometr na trhu. Obrázek 2-4 schematicky znázorňuje tuto technologii. Jedna z klíčových změn spočívá v použití nemagnetického pouzdra, které brání odstředování MR kapaliny z měřicí mezery. Díky tomu je možné měřit při hodnotách smykového spádu až 10^4 s^{-1} . To je zároveň největší hodnota smykového spádu, kterou jsou schopny reometry na trhu dosáhnout. Další významnou změnou je, že MR kapalina je nad i pod rotorem (odtud tedy název TwinGap). Díky tomu se normálové síly od MR kapaliny v aktivovaném stavu částečně vyruší a k přetížení vzduchového ložiska rotoru dojde později. To umožňuje použít velikost magnetické indukce až 1,4 T. Nevýhodou této technologie je pevně daná velikost měřicí mezery 0,3 mm z obou stran disku. Pokud má MR kapalina velké částice nebo pokud se testuje MR kapalina s neznámou velikostí částic, mezera nemusí být dostatečná.



Obrázek 2-4 Geometrie TwinGap™ [3]

Stejný přístup, který zvolila firma Anton Paar GmbH ve své první variantě, zvolily i další firmy, např. TA Instruments, Malvern Panalytical Ltd atd. Další zařízení od jiných výrobců zde proto nebudou uvedena.

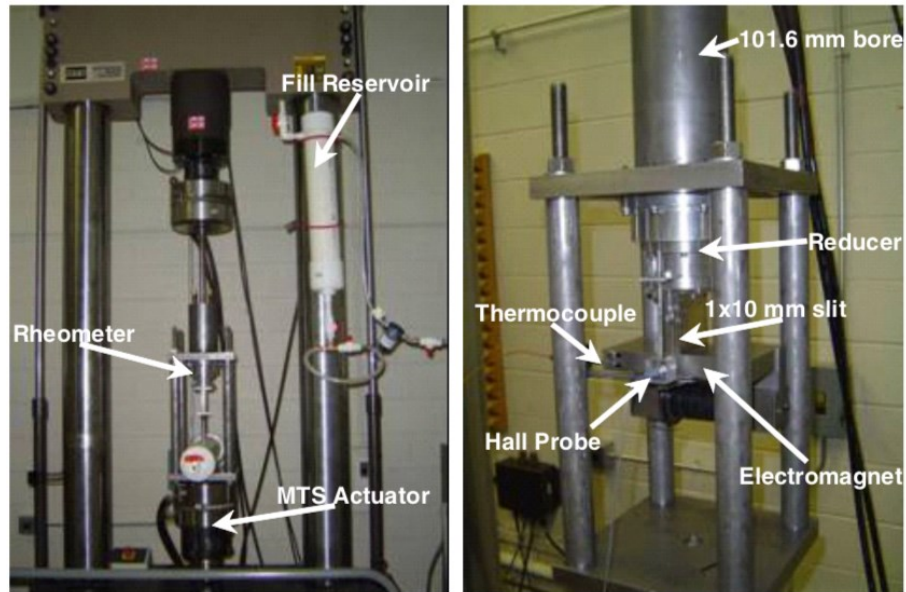
2.1.3 Slit-flow reometry ve světě

V MR tlumičích dosahují hodnoty smykových spádů až 10^6 s^{-1} [4, 5] a například při stříkání barvy se dosahuje podobných hodnot [6]. Komerčně dostupné rotační reometry nejsou schopny tak vysokých hodnot dosáhnout, kvůli tomu měření neprobíhá v reálných podmínkách. To je důvod, proč pro výzkum chování MR kapalin v aktivovaném stavu při vysokých smykových spádech univerzity vyvíjí své vlastní slit-flow reometry.

Slit-flow reometry se od rotačních reometrů výrazně liší. Princip činnosti spočívá v protlačení kapaliny tenkou štěrbinou s přesně definovaným průřezem. Následně se pomocí reologických vztahů vyhodnocují tokové a viskozitní křivky. Ve štěrbině je možné dosáhnout velmi vysokých hodnot smykových spádů, které výrazně přesahují měřicí interval rotačních reometrů. Tyto reometry nejsou komerčně dostupné a vznikly v rámci vývoje na různých univerzitách.

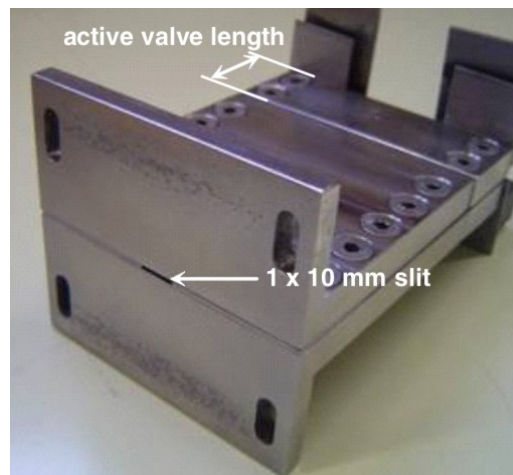
Virginia Polytechnic Institute and State University

Na univerzitě se Virginii zkoumali vliv vysokých smykových spádů na MR efekt [7]. Pro výzkum navrhli a použili slit-flow reometr, ve kterém může kapalina dosáhnout smykového spádu až $2,5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ – viz Obrázek 2-5. K protlačení kapaliny štěrbinou je použit hydraulický aktuátor. S využitím zákona zachování hmoty je možné relativně malou rychlostí pístu aktuátoru dosáhnout velkých rychlostí proudění kapaliny ve štěrbině. Pro měření magnetického pole je v reometru instalována Hallova sonda.



Obrázek 2-5 Slit-flow reometr využívaný během experimentu; vlevo: reometr v zařízení, vpravo: detail reometru [7]

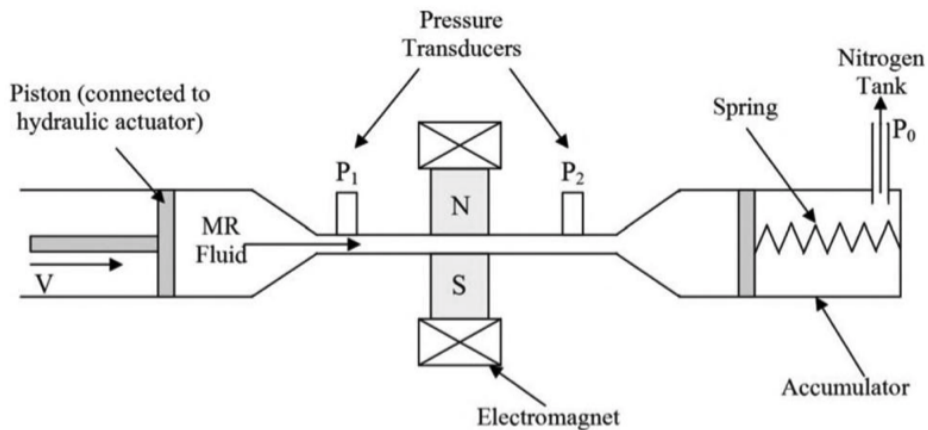
Těleso se štěrbinou je vyrobeno z nerezové oceli – viz Obrázek 2-6. Dva boční kusy jsou od sebe odděleny nerezovými distančními vložkami, takže tvoří požadovanou geometrii štěrbinu. Díky modulárnímu designu je možné podle potřeby měnit různé části, například průřez štěrbinu, délku aktivní zóny atd. Jako aktivní zóna se uvažuje oblast, ve které působí magnetické pole na MR kapalinu. K vytvoření magnetického pole se používá elektromagnet.



Obrázek 2-6 Těleso se štěrbinou používané během experimentu [7]

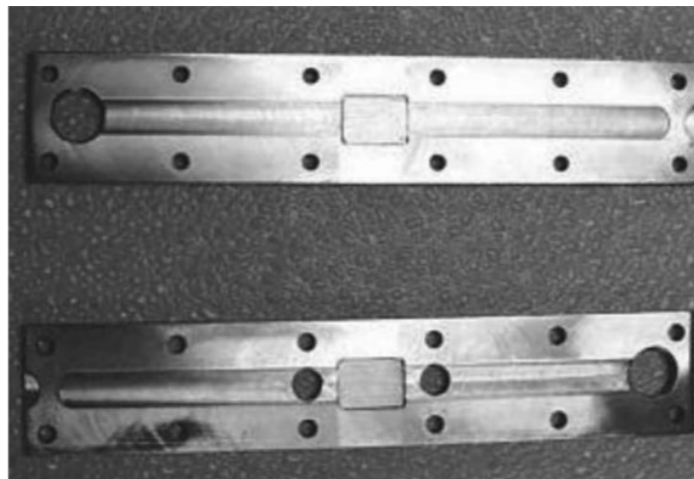
Během měření jsou na reometru jediné proměnné rychlost pístu a síla magnetického pole. Ze známé rychlosti pístu se vypočítá rychlost proudění kapaliny ve štěrbině, ze které se určí smykový spád. Díky použitému rampovému signálu je rychlost proudění konstantní. Zaznamenává se vzniklá síla, kterou musí aktuátor na reometr působit a také teplota kapaliny.

Na univerzitě v Nevadě zkoumali vliv drsnosti stěn štěrbinu na chování MR kapaliny [8]. Použili k tomu reometr vlastní konstrukce, který umožňuje měřit při smykovém spádu až 9000 s^{-1} – viz Obrázek 2-7. K jeho pohonu je použit hydraulický aktuátor Instron Model 8821S.



Obrázek 2-7 Schéma reometru [8]

Reometr pracuje s obdélníkovou štěrbinou o rozměrech $14 \times 10 \times 1 \text{ mm}$, kterou tvoří dvě hlavní části – viz Obrázek 2-8. Konstrukce pro vytvoření štěrbinu využívá vložky umístěné ve vybrání. Systém obsahuje tlakoměry před a za štěrbinou pro výpočet tlakového spádu, Gauss metr pro měření magnetického pole, senzor posuvu pístu a akumulátor, ve kterém je dusík natlakovaný na $0,35 \text{ MPa}$.



Obrázek 2-8 Dvoudílné těleso se štěrbinou [8]

2.1.4 Reometry vyvinuté na Ústavu konstruování

Stejně jako na jiných univerzitách ve světě, i na VUT v Brně se věnuje pozornost chování MR kapalin při vysokých smykových spádech, které odpovídají reálným hodnotám v MR tlumičích. Na trhu nejsou dostupné reometry, které by měřily nemagnetické i MR kapaliny v odpovídajících hodnotách smykového spádu. Z tohoto důvodu přišli výzkumníci z odboru Diagnostiky na Ústavu konstruování s nápadem na vlastní konstrukci slit-flow reometru, kterou si následně nechali patentovat včetně metody vyhodnocení. Vznikly postupně tři evoluce slit-flow reometru.

Během návrhu byl kladen důraz na to, aby bylo možné zařízení instalovat do jakéhokoliv mechanického, elektrického nebo hydraulického lineárního aktuátoru. K pohonu se tak použil hydraulický pulsátor Inova, který je dostupný ve školní laboratoři. Rámová konstrukce, ve které je usazen, byla navržena pro maximální zatížení až 40 kN [9]. Díky tomu odpadla nutnost řešit pohon reometru a zvýšila se univerzálnost. Dalším požadavkem byla možnost přesného měření teploty testované kapaliny.

Výhodou reometrů vyvinutých na Fakultě strojního inženýrství je hlavně dosažení vysokých hodnot smykových spádů, přesné měření teploty testované kapaliny, jednoduchá instalace do jakéhokoliv lineárního aktuátoru, temperační okruh, nízké pořizovací a provozní náklady a také schopnost pracovat v dlouhodobém režimu [1].

Schopnost pracovat v dlouhodobém režimu je velká výhoda, protože reometry je možné použít nejen pro testování vlastností MR kapalin, ale také jako zátěžné jednotky při trvanlivostních zkouškách. Tyto kapaliny totiž nemají neomezenou životnost, během používání postupně degradují až do bodu, kdy už je nelze použít. Tyto zkoušky jsou proto zásadní pro odhad životnosti MR kapaliny, na které závisí i životnost daného zařízení.

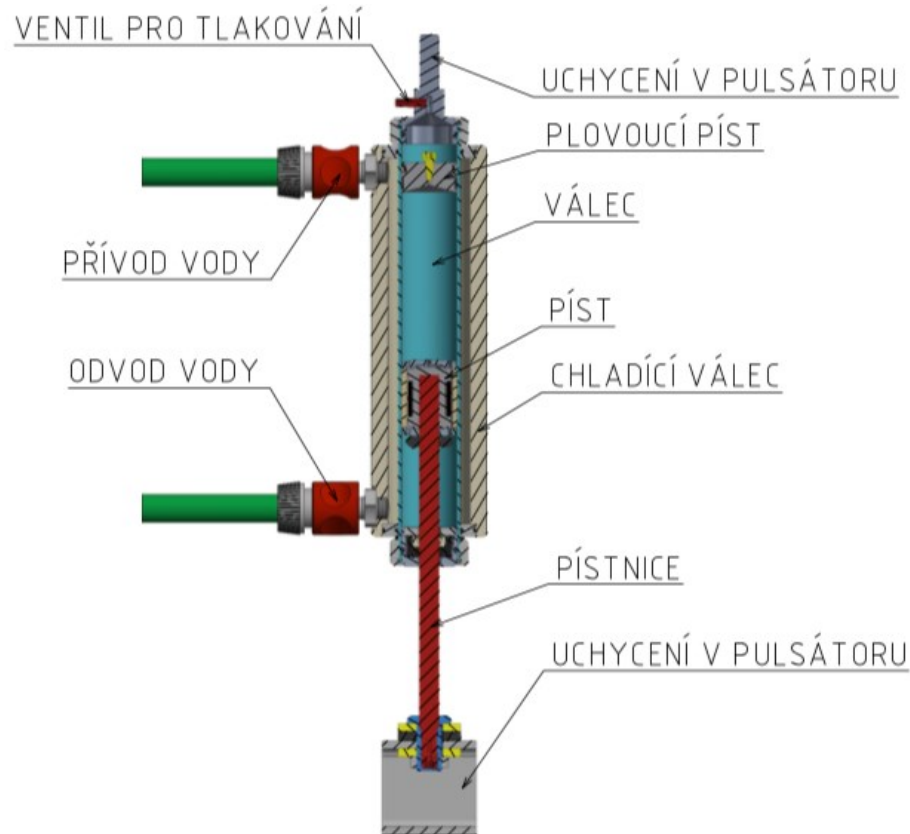
V současnosti se trvanlivostní zkoušky MR kapalin na komerčních reometrech komplikují tím, že se musí manipulovat se vzorkem. Na reometru se totiž jenom naměří požadované hodnoty, pak se vzorek kapaliny musí přenést do zatěžovacího zařízení, kde se zatěhuje a nakonec se vzorek přenesení zpátky do reometru pro změření změny vlastností. Díky konstrukci slit-flow reometru tento problém odpadá, přechod mezi oběma fázemi je dán pouhou změnou programu ovládajícího lineárního aktuátoru.

Evoluce 1

Pro první konstrukci reometru se využil upravený tlumič Delphi MagneticRide z auta Audi TT [5]. Díky tomu odpadla nutnost řešit celou konstrukci zařízení a byla zde taky ta výhoda, že měření probíhala v reálné geometrii – viz Obrázek 2-9.

Na původním tlumiči se provedlo několik úprav, které byly nezbytné pro zamýšlené použití. Upravoval se válec, zaslepily se obtokové kanálky na pístu, řešilo se uchycení k pulsátoru a přidal se temperační okruh pro zajištění požadované teploty. Také plovoucí píst se upravil, aby bylo možné provést odvodu vzduchu.

Použití teplotního senzoru pro měření teploty přímo ve štěrbině by vedlo k velkým zásahům do konstrukce. Z tohoto důvodu byla po kalibraci použita závislost elektrického odporu cívky na teplotě. Cívka byla umístěna v pístu. Tepelnou dilataci MR kapaliny kompenzuje plovoucí píst.



Obrázek 2-9 První evoluce reometru

Během testování se měřila pouze síla na píst v závislosti na poloze pístu. Síla se měřila tenzometrickým siloměrem a poloha pístu se měřila senzorem zabudovaným v hydraulickém pulsátoru Inova. K reometru byla připravena metoda vyhodnocení, která byla nutná pro odvození reologických veličin z těchto naměřených hodnot.

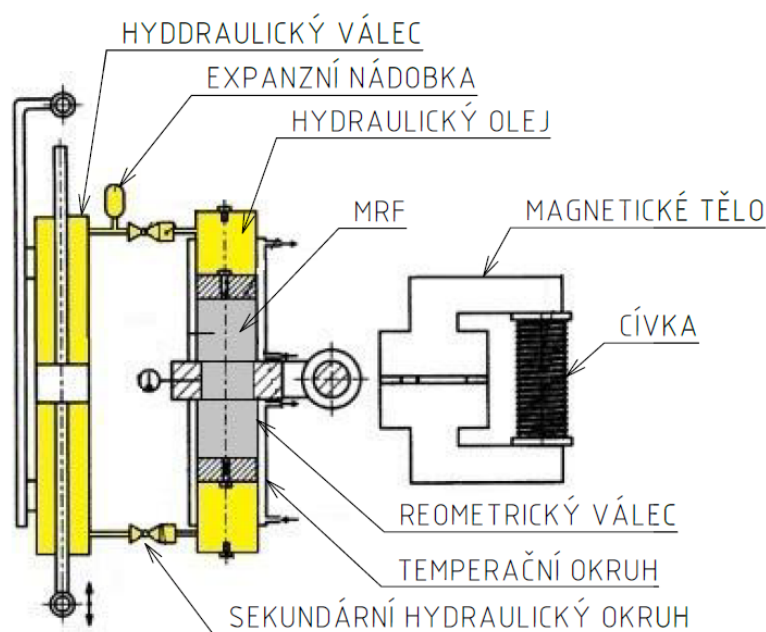
Reometr ze začátku plnil svou funkci, nicméně po nějaké době používání se vyskytl problém s izolací vinutí cívky. Při používání docházelo k pružení izolace a postupně se vrstva mezi jednotlivými závity prodřela. To mezi nimi způsobilo zkraty a kvůli tomu už nebylo možné přesně měřit teplotu ve štěrbině. Měření teploty navíc obsahovalo velké zpoždění, protože trvalo, než se teplo z kapaliny dostalo k cívce. Tato doba se pohybovala přibližně kolem půl minuty. Dalším problémem tohoto konceptu je měření síly. Do naměřené hodnoty jsou totiž vneseny i parazitní jevy – tření těsnění, tření pístu o válec apod. Jelikož navržená metoda vyhodnocení počítá pouze se změřenou silou, je do výsledných hodnot zanesena nepřesnost. Základní technická data reometru shrnuje Tabulka 2-1.

Tabulka 2-1 Základní technická data 1. evoluce reometru [5]

Parametr	Velikost
Maximální frekvence pulsátoru	30 Hz
Zdvih pulsátoru	50 mm
Maximální rychlost pístu	7,8 m/s
Plocha štěrbin	67,7 mm ²
Plocha pístu	944,5 mm ²
Tloušťka štěrbin	0,75 mm
Délka štěrbin	37 mm
Max. intenzita magnetického pole	150 kA/m
Max. pracovní teplota	120 °C

Evoluce 2

Druhá evoluce slit-flow reometru se od první výrazně liší. Reometr už není tvořen upraveným MR tlumičem z auta, ale vznikla zcela nová konstrukce [1] – viz Obrázek 2-10. Skládá se ze dvou válců napojených na magnetické tělo se štěrbinou, které má nově vyvedenou cívku mimo prostor s kapalinou. Magnetický tok byl veden magnetickým tělem obvodu až ke štěrbině. Reometr nově umožňuje měřit různé objemy kapaliny od 30 ml do 100 ml.



Obrázek 2-10 Druhá evoluce slit-flow reometru; celkové schéma (vlevo), pohled na magnetické tělo (vpravo) [1] (upraveno)

U této evoluce je přenos síly z pulsátoru na plovoucí písty řešen sekundárním hydraulickým okruhem. Hydraulický válec z tohoto okruhu je spojen s pulsátorem, který svým pohybem vytváří potřebný tlak v hydraulickém oleji. Ten je potrubím přenášen na plovoucí písty reometru. Na spojovacím potrubí je umístěna expanzní nádobka, která kompenzuje tepelnou dilataci kapaliny.

Během testování MR kapalin se měřila síla na píst v závislosti na jeho poloze, tlak před a za štěrbinou a teplota. Poloha pístu se měřila nepřímo pomocí snímače zabudovaného v lineárním aktuátoru. Velikost síly naměřená tenzometrickým siloměrem zde slouží už jen jako pojistka proti zničení reometru. Spolu s druhou evolucí reometru totiž vznikla také nová metoda vyhodnocení, která je patentována. Síla pro vyhodnocování měření se určuje z tlakové difference před a za štěrbinou, díky tomu bude určena přesně bez parazitních jevů popsanych u předešlé evoluce.

Reometr je usazen v adaptéru, který ho spojuje s hydraulickým válcem. Při demontáži reometru adaptér s hydraulickým válcem zůstává připojen na pulsátoru. Aby nedošlo k úniku hydraulického oleje, jsou v sekundárním hydraulickém okruhu instalovány ventily.

Problematickou oblastí tohoto řešení je sekundární hydraulický obvod, ze kterého pramení nejvíce nevýhod. Celé zařízení je kvůli němu poměrně komplikované. Během demontáže reometru dochází i při uzavřených ventilech k částečným únikům hydraulického oleje, takže se musí čistit okolní prostředí a doplňovat olej. Po jeho doplnění je následně nutné celý sekundární hydraulický obvod odvzdušnit, což komplikuje a prodlužuje přípravu měření. Odvzdušnění navíc nebylo možné provést úplně, v systému se totiž vždycky objevila pružnost, kvůli které byl záznam polohy plovoucího pístu nepřesný. Základní technická data shrnuje Tabulka 2-2.

Tabulka 2-2 Základní technická data 2. evoluce reometru [1]

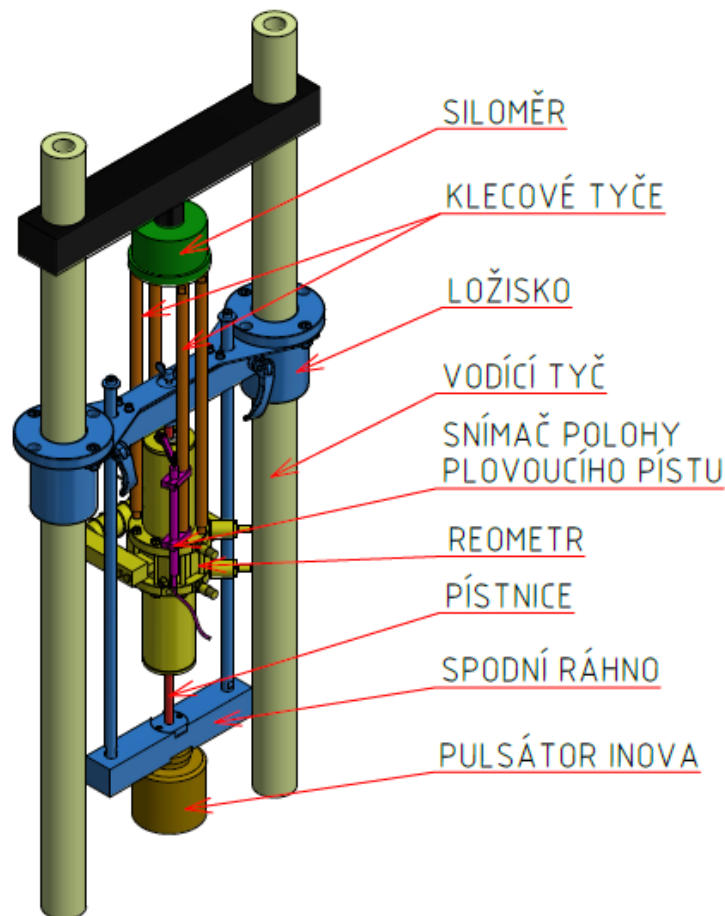
Parametr	Velikost
Maximální frekvence pulsátoru	30 Hz
Maximální zdvih pulsátoru	150 mm
Maximální rychlost pístu	7,8 m/s
Plocha štěrbin	37,5 mm ²
Plocha pístu	876,0 mm ²
Tloušťka štěrbin	0,75 mm
Délka štěrbin	15 mm
Max. intenzita magnetického pole	300 kA/m
Max. pracovní teplota	120 °C

Evoluce 3

V současnosti poslední evoluce slit-flow reometru, která se používala k měření – viz Obrázek 2-11. Pro protlačení kapaliny byl stále využíván hydraulický pulsátor Inova, ale k přenosu síly se již nepoužívá hydraulická vazba, ta byla nahrazena vazbou mechanickou. Odstraněním sekundárního hydraulického obvodu se celá konstrukce odlehčila a zjednodušila. Také díky tomu odpadla nutnost řešit úniky hydraulického oleje při demontáži reometru a odpadlo také následné odvzdušňování sekundárního hydraulického obvodu. Reometr stále umožňuje měřit různé objemy kapaliny od 30 ml do 100 ml.

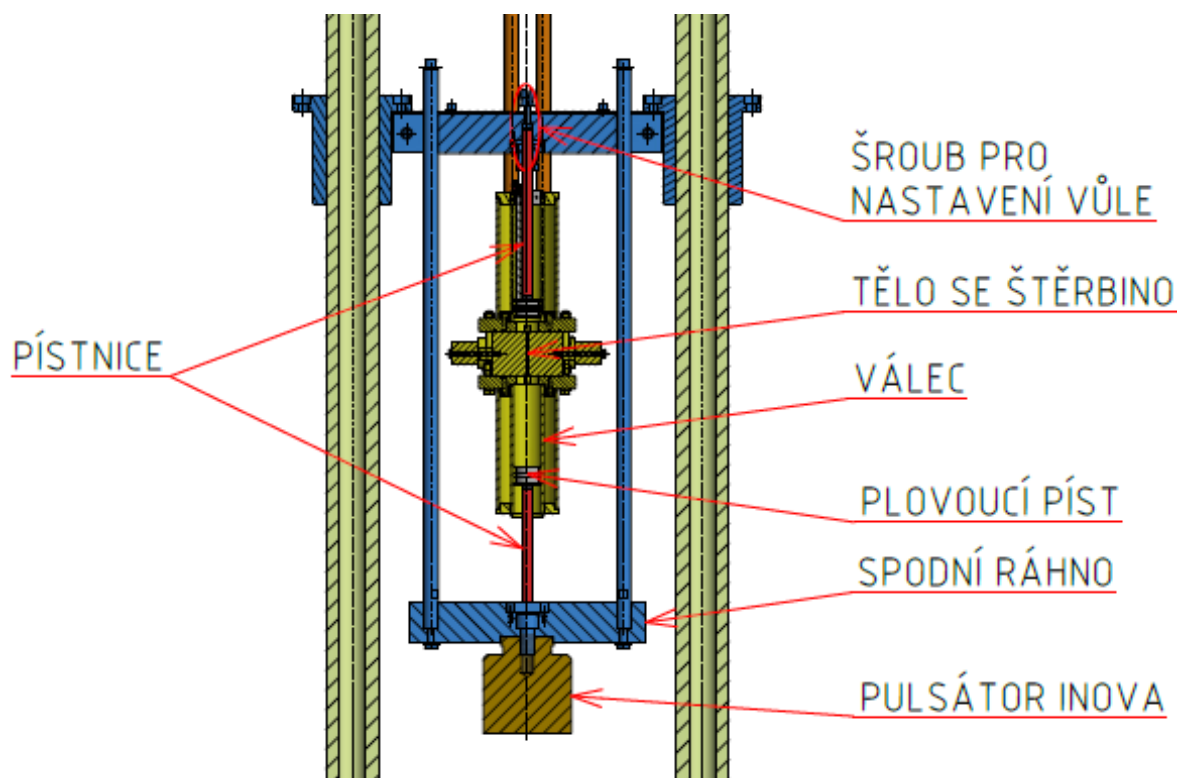
Konstrukce reometru zůstala stejná, jako u druhé evoluce. Stejně tak se používá stejná metoda pro vyhodnocení měření. K měření teploty testované kapaliny se nejdříve používaly dva teploměry umístěné na obou stranách štěrbin. Nicméně časem se přešlo pouze k jednomu teploměru na jedné straně štěrbin. Nově se u třetí evoluce měří přímo pohyb plovoucího pístu pomocí potenciometrického lineárního senzoru.

Do této evoluce je možné krom magnetického těla instalovat i jiné tělo určené pro měření nemagnetických kapalin. Toto tělo je zhotoveno z jednoho kusu a štěrbina v něm je vytvořena pomocí technologie elektroerozivního obrábění. Vnitřní průměr válce je 32 mm, přičemž šířka štěrbin je 50 mm pro magnetické i nemagnetické tělo.



Obrázek 2-11 Třetí evoluce slit-flow reometru v rámu hydraulického pulsátoru Inova

Uchycení reometru do rámu je řešeno klecovými tyčemi připevněnými na siloměr. Pro přenos síly na plovoucí písty jsou využity pístnice. V uložení hydraulického pulsátoru jsou ale nepřesnosti, které způsobují, že jeho osa je vychýlena. Spodní ráhno je na pístu hydraulického pulsátoru uloženo přesně díky lícovanému zahlabení pro píst (viz Obrázek 2-12). Jelikož jsou pístnice pevně spojeny se spodním ráhnem rámu pohonu reometru, vychýlení hydraulického pulsátoru způsobí i vychýlení pístnic a síla tak na reometr nepůsobila přesně v jeho ose. Kvůli tomu není konstrukce rovnoměrně namáhána a také se více opotřebovávají vodící kroužky na plovoucích pístech. Pevně spojené pístnice komplikují proces vkládání nebo vyjímání reometru.



Obrázek 2-12 Řez reometrem uloženým v hydraulickém pulsátoru Inova

Během testování se měří poloha plovoucího pístu, tlak před a za štěrbinou, teplota a síla. Velikost síly ze záznamu siloměru zde opět funguje pouze jako bezpečnostní parametr. V řídicím programu se nastaví maximální hodnota síly, při jejíž dosažení se pulsátor vypne a zabrání tak možnému zničení reometru. Pro vyhodnocování měření se využívala patentovaná metoda vyhodnocení, která vznikla u druhé evoluce slit-flow reometru. Síla vstupující do vyhodnocovacího mechanismu je spočítána na základě tlakového spádu. Kompenzace tepelné dilatace kapaliny je umožněna pomocí nastavitelné vůle horní pístnice.

Nevýhodou této varianty je poměrně zdoluhavý proces výměny vzorku a špatná uživatelská přívětivost. Způsobuje to zejména problematická montáž nebo demontáž reometru na vodící tyče a velké množství šroubů použitých jak v samotném reometru, tak v jeho uchycení. Dalším zdrojem protahování příprav reometru na měření je jeho odvodušňování. To se skládá z více úkonů, které by se daly výrazně zjednodušit a zrychlit vhodnými přípravky, které ale ke třetí evoluci reometru nebyly navrženy. Doba výměny vzorku od okamžiku demontáže reometru z pulsátoru až do okamžiku jeho opětovné montáže je zhruba 40 minut. Konstrukce je dimenzována na zatížení 7 kN, což ovlivňuje maximální sílu, kterou může lineární aktuátor působit na válec. Tabulka 2-3 shrnuje základní technická data této evoluce.

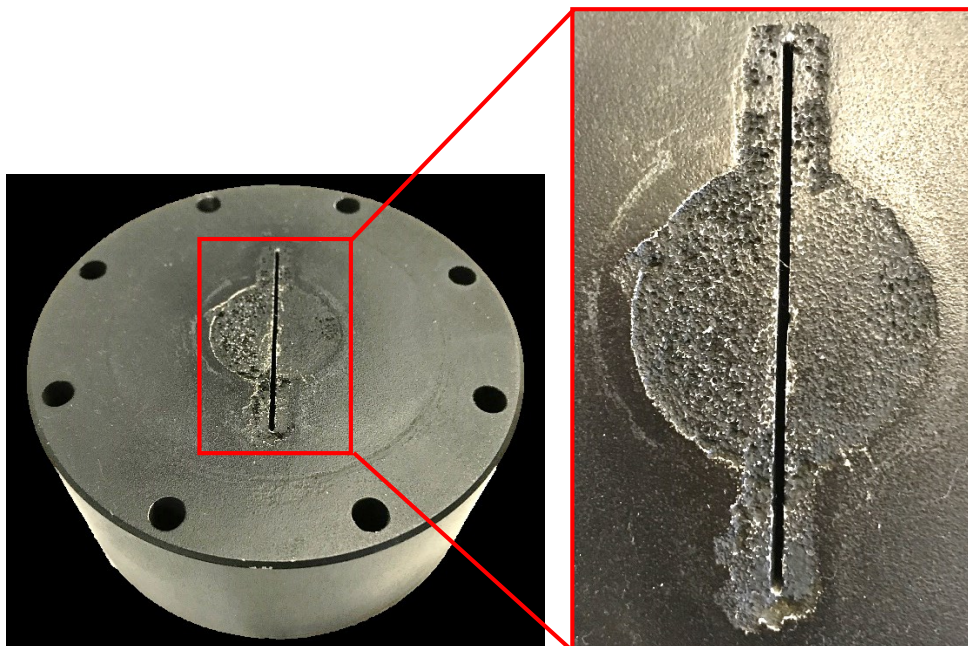
Tabulka 2-3 Základní technická data 3. evoluce reometru

Parametr	Velikost
Maximální frekvence pulsátoru	30 Hz
Maximální zdvih pulsátoru	150 mm
Maximální rychlost pístu	7,8 m/s
Plocha štěrbin	37,5 mm ²
Plocha pístu	804,25 mm ²
Tloušťka štěrbin	0,6 mm
Délka štěrbin	37 mm
Max. intenzita magnetického pole	150 kA/m
Max. pracovní teplota	120 °C

Štěrbina

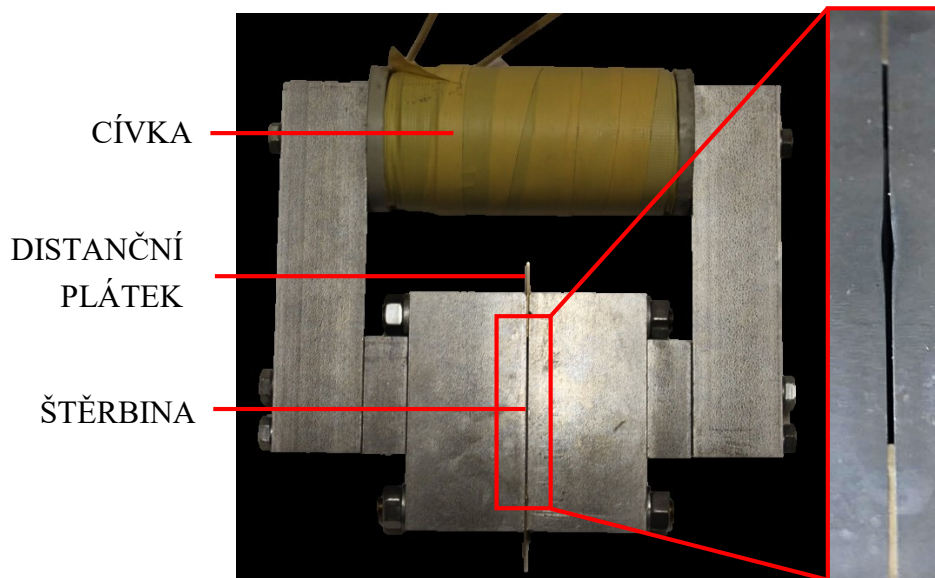
Štěrbina je klíčový prvek slit-flow reometru, kterým se protlačí kapalina. Jak již bylo zmíněno dříve, reometr je možné použít k měření všech druhů kapalin včetně MR kapalin. K tomuto účelu jsou vyrobeny dvě těla obsahující štěrbinu. Konstrukce slit-flow reometru třetí evoluce umožňuje navíc použít různé délky štěrbin.

Nemagnetické tělo obsahuje štěrbinu vytvořenou technologií elektroerozivního obrábění. Tato technologie byla jediná možnost pro vytvoření úzké štěrbin v celistvém kusu materiálu. Přesnost štěrbin byla ovlivněna rozkmitáním drátu během výroby. Navíc není možné zpětně ověřit přesnost stěn štěrbin a jejich drsnost. Obrázek 2-13 poskytuje pohled na nemagnetické tělo i s detailem štěrbin po nějaké době používání. V jejím okolí je na čelní ploše patrné velké opotřebení způsobené kapalinou. Tvar opotřebení je dán geometrií v přírubě.



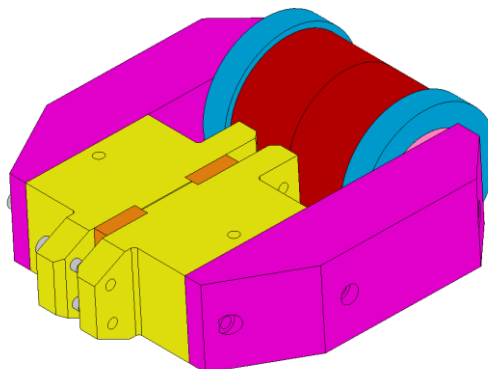
Obrázek 2-13 Vlevo: nemagnetické tělo, vpravo: pohled na štěrbinu

Magnetické tělo se od nemagnetického liší v tom, že ve štěrbině vytváří homogenní magnetické pole, které přivádí MR kapalinu do aktivovaného stavu. Jeho konstrukce je složitější, protože se skládá z více součástí – viz Obrázek 2-14. Magnetické pole se vytváří pomocí cívky a je vedeno magneticky měkkým materiálem (behanit) až ke štěrbině. Díky nevodivým mosazným distančním plátkům je většina magnetického toku soustředěna do prostoru štěrbiny. Na detailním pohledu na štěrbinu je patrné výrazné opotřebení v její střední části.



Obrázek 2-14 Vlevo: Magnetické tělo, vpravo: pohled na opotřebení štěrbiny

Kvůli tomu, že distanční plátky mají stejnou tloušťku jako štěrbinu, docházelo k magnetickému toku i přes tyto plátky a to vedlo k oslabení magnetického toku ve štěrbině. Proto se v rámci výzkumu na Ústavu konstruování začalo vyvíjet nové magnetické tělo, jehož geometrie je založena na simulacích magnetického toku. Návrh byl dopracován do fáze modelu – viz Obrázek 2-15. Je vidět, že tloušťka distancí je výrazně větší, než je tloušťka štěrbiny.



Obrázek 2-15 Návrh magnetického těla

Metoda vyhodnocení

Metoda vyhodnocení, která se používala u druhé a třetí evoluce reometru, je patentovaná [1]. Její hlavní výhodou je, že síla, pomocí které se protlačuje kapalina štěrbinou, je určena na základě tlakového spádu. Díky tomu se odstraní parazitní vlivy (např. tření), které by její hodnotu mohly navýšit a zanést tak nepřesnosti do výsledků. Reologické vztahy jsou odvozeny za předpokladu laminárního proudění a také se předpokládá nulový skluz na stěně štěrbinu.

Během měření se snímá teplota kapaliny, tlak na obou stranách štěrbinu, síla vyvinutá hydraulickým pulsátorem a poloha plovoucího pístu. Síla vyvinutá hydraulickým pulsátorem nevstupuje do vyhodnocovacího programu, její úlohou je pouze chránit konstrukci proti přetížení.

Viskozitu kapaliny nejvíce ovlivňuje její teplota. Na základě záznamu polohy plovoucího pístu v čase je určen objemový průtok. Tato data se ale používají ještě v další části vyhodnocovacího programu pro určení zrychlení. K vyhodnocování se totiž berou pouze body, ve kterých je zrychlení blízké nule, aby se odstranil vliv pružnosti a setrvačných sil.

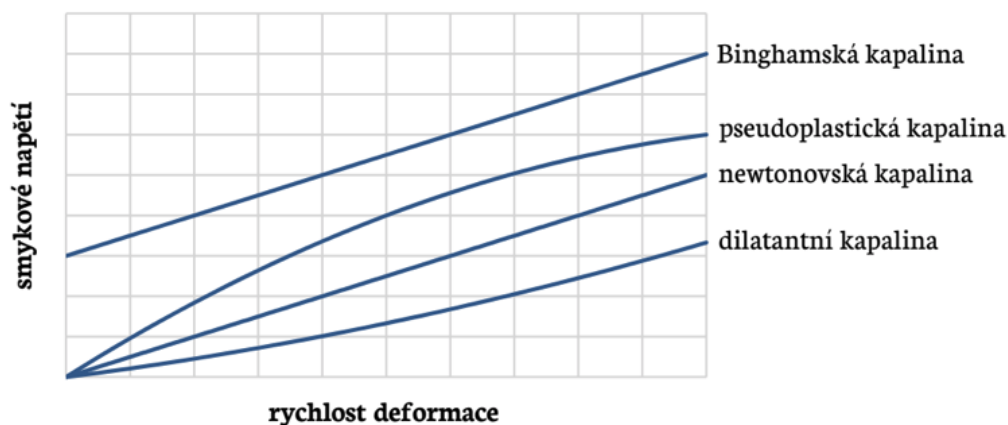
2.2 Vyhodnocení tokových křivek

Toková křivka vyjadřuje závislost smykového napětí v kapalině na rychlosti deformace (smykovém spádu). Smykový spád vzniká během proudění kapaliny a počítá se podle rovnice (2-1). Na základě této rovnice je vidět, že smykový spád v kterémkoliv místě proudící kapaliny je dán derivací rychlostního profilu v tomto místě.

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy} \quad (2-1)$$

Kde $\dot{\gamma}$ je smykový spád v s^{-1} , u je skutečná rychlost proudění v libovolném místě udávaná v m/s a y je libovolná poloha kolmá na směr proudění (od stěny směrem do kapaliny).

Na základě průběhu tokové křivky se rozlišují základní druhy kapalin – viz Obrázek 2-16.



Obrázek 2-16 Reogram [10]

Kapaliny se obecně dělí na newtonské a ne-newtonské. Další dělení je provedeno podle charakteristického chování daných typů kapalin během tečení. Na základě těchto charakteristických projevů byly popsány tzv. reologické modely. Kapaliny mohou být dále ještě viskoelastické. To znamená, že se kapalina částečně vrátí do původního tvaru, jakmile přestane působit smykové napětí.

2.2.1 Newtonské kapaliny

Newtonské kapaliny se chovají podle Newtonova zákona viskozity a díky konstantní viskozitě při dané teplotě je závislost smykového napětí na smykovém spádu lineární. Na reogramu jsou charakterizovány přímkou vycházející z počátku. Velikost smykového napětí je možné jednoduše spočítat podle Newtonova vztahu – viz rovnice (2-2). Typickou newtonskou kapalinou je voda.

$$\tau_k = \eta \frac{du}{dy} \quad (2-2)$$

kde τ_k je velikost smykového napětí v Pa, η je dynamická viskozita v Pa.s a du/dy je smykový spád v s^{-1} (viz rovnice (2-1)).

2.2.2 Ne-newtonské kapaliny

Ne-newtonské kapaliny jsou charakteristické tím, že jejich viskozita není konstantní, kromě teploty a tlaku je navíc závislá na rychlosti deformace, popřípadě na čase [10, 11]. Proto není možné popsat chování kapaliny jednou hodnotou viskozity. U ne-newtonských kapalin se určuje tzv. zdánlivá viskozita. To je konkrétní hodnota pro danou teplotu a daný smykový spád. Viskozita přímo ovlivňuje vzniklé smykové napětí, takže jeho průběh je také ovlivněn a už není lineární. Ne-Newtonských kapalin je mnoho druhů a každý se chová rozdílně.

Pro **binghamskou** kapalinu je charakteristické to, že k jejímu tečení dochází až po překročení potřebného minimálního smykového napětí, tzv. meze toku. Jakmile napětí v kapalině překoná mez toku, dále teče jako newtonská kapalina. Typické binghamské kapaliny jsou například zubní pasta a mazací tuk. Binghamský model je jeden z mnoha, který se používá pro popis chování magnetoreologické kapaliny v magnetickém poli [12].

U **Pseudoplastických** kapalin s rostoucím smykovým spádem dojde ke snižování viskozity, naopak **dilatantní** kapaliny svou viskozitu zvyšují s růstem smykového spádu.

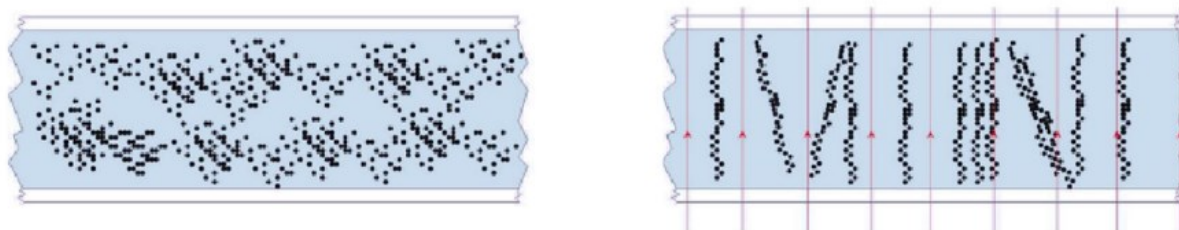
Tyto tři druhy ne-newtonských kapalin mají jednu společnou vlastnost. Jejich chování je nezávislé na době působení smykového napětí. Existují ale další reologické modely, které mají časově závislé vlastnosti. Jsou to kapaliny tixotropní a reopexní. **Tixotropní** kapaliny se vyznačují tím, že při stálé velikosti smykového spádu v čase se zmenšuje velikost smykového napětí (tím i viskozita). **Reopexní** kapaliny vykazují přesně opačné chování.

Kromě zmíněných nejznámějších reologických modelů existují ještě další, které detailněji popisují reálné chování kapalin. Mezi nejčastěji používané patří například Herschel Bulkleyho reologický model, biviskózní reologický model, Crossův reologický model a Carreaův reologický model [13].

Magnetoreologické kapaliny

Magnetoreologické (MR) kapaliny jsou speciální kapaliny, které se skládají z feromagnetických částic, nosné kapaliny a přísad. Jedná se o tzv. chytrý materiál, jehož vlastnosti se dají řídit. U těchto kapalin se rozlišují dva stavy – aktivovaný a neaktivovaný.

V neaktivovaném stavu je MR kapalina tehdy, pokud se nenachází v magnetickém poli. V tomto stavu vykazuje chování podle newtonského reologického modelu [7]. Pokud se MR kapalina dostane do magnetického pole, feromagnetické částice se uspořádají ve směru magnetického toku a vytvoří řetězce – viz Obrázek 2-17. Jedná se o aktivovaný stav kapaliny, ve kterém se její vlastnosti skokově změní na ne-newtonské. Tyto zřetězené částice poté kladou odpor proti tečení a objevuje se mez toku. Tento jev se označuje jako magnetoreologický efekt.

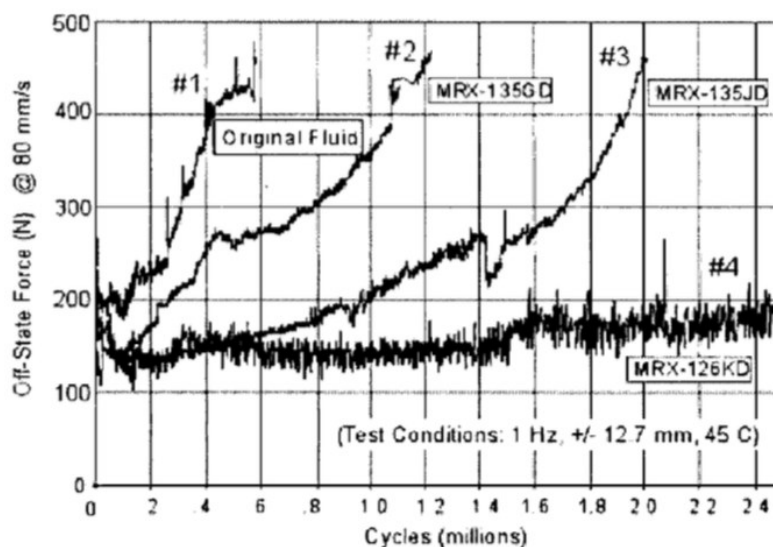


Obrázek 2-17 *Vlevo: MR kapalina v neaktivovaném stavu; vpravo: MR kapalina v aktivovaném stavu (v magnetickém poli)* [14]

Ke zřetězení feromagnetických částic v magnetickém poli nedojde okamžitě, i přes to je ale celý jev velmi rychlý. Doba, která je potřebná pro přechod z neaktivovaného stavu do aktivovaného a naopak, se pohybuje řádově v milisekundách [14, 15]. Pokud je MR kapalina vystavena magnetickému poli kratší dobu, nedojde k úplnému zřetězení feromagnetických částic a tím se oslabí magnetoreologický efekt – viz kapitola 2.3.3.

Pro proudění MR kapalin v aktivovaném stavu je charakteristický vznik tzv. jádra [1]. Jádro je typické pro kapaliny, ve kterých musí smykové napětí dosáhnout meze toku, aby kapalina začala téct. Smykové napětí je největší na rozhraní kapalina – stěna štěrbiny a směrem ke středu štěrbiny klesá. Jakmile klesne pod mez toku, kapalina přestane téct a vytvoří se v ní tuhé jádro.

Životnost MR kapalin není neomezená. U starších typů MR kapalin docházelo po relativně krátké době k silnému provoznímu houstnutí, které Carlson [4] označil jako In Use Thickening (UIT). To je možné přeložit jako provozní houstnutí. Tento jev oddálil komerční rozšíření MR kapalin o několik let. Velké zhoustnutí kapaliny vedlo totiž k vysoké tlumící síle MR tlumičů v neaktivovaném stavu. To je nežádoucí, protože po MR tlumičích se chce, aby měly jak velmi nízkou tlumící sílu v neaktivovaném stavu, tak naopak velmi velkou tlumící sílu ve stavu aktivovaném. Proto se věnovala pozornost k vývoji nových druhů MR kapalin, u kterých by provozní houstnutí nebylo tak výrazné – viz Obrázek 2-18.



Obrázek 2-18 Vývoj MR kapalin odolných proti provoznímu houstnutí [4]

Jako příčinu provozního houstnutí určil Carlson zvýšení viskozity. K tomu dojde v důsledku odlupování povrchové vrstvy na feromagnetických částicích v kapalině. Tato povrchová vrstva je totiž křehká kvůli oxidaci a vzájemná interakce mezi částicemi ji snadno naruší. Tímto procesem se do MR kapaliny uvolňují nanočástice, které způsobují provozní houstnutí kapaliny.

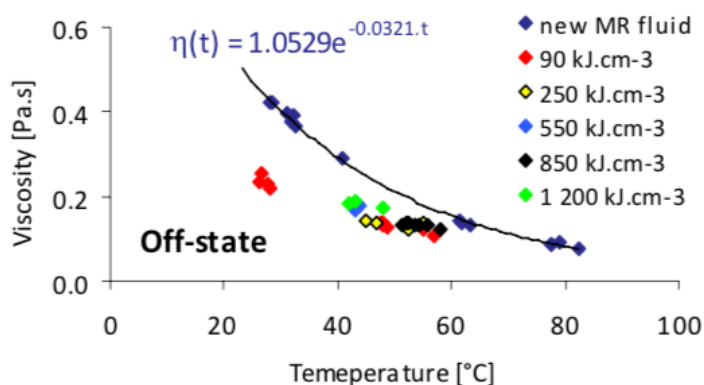
Je vidět, že vývojem nových druhů MR kapalin došlo téměř k potlačení vlivu provozního houstnutí, které už není tak výrazné. Přesto je tento jev stále přítomný a je nutné se věnovat dlouhodobému testování MR kapalin [16].

Životnost MR kapaliny je také možné vyjádřit pomocí parametru LDE (Lifetime Dissipated Energy), který je dán vztahem (2-3) [4].

$$LDE = \frac{1}{V} \int_0^{life} P dt \quad (2-3)$$

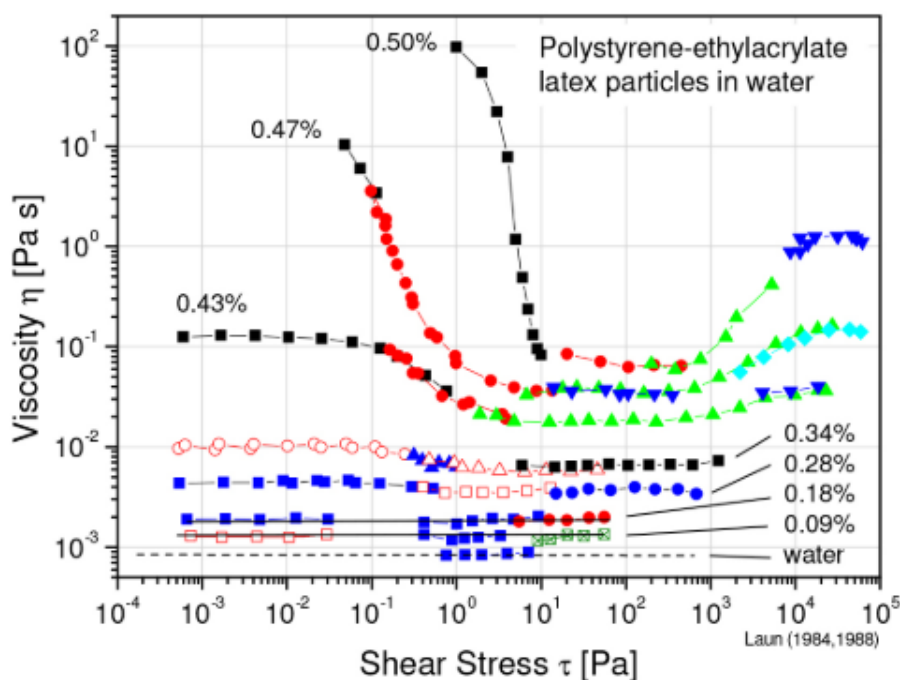
Kde V je objem kapaliny v m^3 , P je okamžitý mechanický výkon přeměněný na teplo ve W a t je čas.

V závislosti na tomto parametru je možné popsat další jev, ke kterému dochází při dlouhodobém zatěžování MR kapalin. Jedná se o změnu viskozitního indexu [15]. Už po disipaci 90 kJ.cm^{-3} je patrný výrazný rozdíl oproti nové MR kapalině – viz Obrázek 2-19. Tento rozdíl se dále zmenšuje jenom minimálně.



Obrázek 2-19 Závislost viskozity na teplotě při různé míře disipované energie [15]

MR kapaliny jsou v podstatě suspenze, které tvoří feromagnetické částice rozptýlené v nosné kapalině s přísadami. Podle koncentrace feromagnetických částic se může viskozita zvětšovat i snižovat s rostoucím smykovým napětím. Obrázek 2-20 poskytuje pohled na chování suspenze částic ve vodě, které vykazuje popsání chování. Toto chování kapalin je možné popsat pouze na základě experimentálních měření.



Obrázek 2-20 Změna viskozity v závislosti na smykovém spádu [17]

2.3 Průtok kapaliny štěrbinou

Během průtoku kapaliny štěrbinou vzniká tlakový spád. Reometry vyvinuté na ústavu konstruování mají k jeho měření na obou stranách štěrbině umístěny tlakoměry. Na základě něj se získává část vstupních hodnot do vyhodnocovacího programu. Chování kapaliny během vtoku do štěrbině a následném průtoku ovlivní velikost tlakového spádu a tím i naměřené výsledky. Během průtoku musí být ve štěrbině přítomno pouze laminární proudění, protože patentovaná metoda vyhodnocení je na tomto předpokladu postavena.

Přechod z laminárního proudění na turbulentní je možné obecně popsat na základě Reynoldsova čísla, jehož hraniční hodnota pro laminární proudění se obecně bere 2300 [11, 18, 19]. Nicméně závisí také na dalších vlivech, například stupeň turbulence přitékajícího proudu, drsnost stěn, počáteční úsek potrubí s vlivem zaoblení hran [18]. Není tedy vyloučeno, že laminární proudění se při příznivých podmínkách může objevit i u výrazně vyšších hodnot Reynoldsova čísla [11, 18, 20].

Reynoldsovo číslo je bezrozměrné podobnostní číslo, díky kterému je možné přibližně určit, kdy je proudění laminární nebo přechodné a kdy je už turbulentní. Jeho výpočet je založen na poměru setrvačných a viskózních sil a znázorňuje ho rovnice (2-4).

$$Re = \frac{v_s D}{\nu} = \frac{\rho v_s D}{\mu_k} \quad (2-4)$$

kde Re je Reynoldsovo číslo, v_s je střední rychlost ve štěrbině v m/s, D je průměr potrubí v m, ν je kinematická viskozita kapaliny v m^2/s , ρ je hustota kapaliny v kg/m^3 a μ_k je dynamická viskozita kapaliny v Pa.s.

Pro výpočet Reynoldsova čísla proudící kapaliny v jiném než kruhovém průtočném profilu se používá tzv. hydraulický průměr d_h . Jeho výpočet pro štěrbinu s obdélníkovým průřezem o rozměrech $b \times h$ znázorňuje rovnice (2-5).

$$d_h = \frac{2bh}{b + h} \quad (2-5)$$

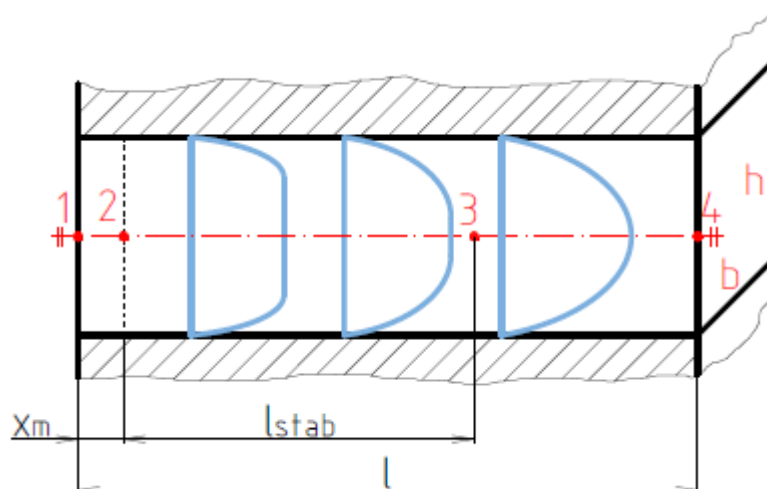
Kde d_h je hydraulický průměr v m, b podélný rozměr štěrbin v m a h je příčný rozměr štěrbin v m.

V následujících podkapitolách jsou popsány jevy, které se objeví během průtoku kapaliny štěrbinou.

2.3.1 Chování nemagnetické kapaliny

Je důležité rozlišit několik oblastí ve štěrbině, které se objeví vždy bez ohledu na tvar a velikost jejího průřezu. Ve slit-flow reometru je použita obdélníková štěrba, proto kvůli lepší názornosti je tato štěrba o průřezu $b \times h$ a délce l schematicky znázorněna – viz Obrázek 2-21. Dále v téhle kapitole budou rozebrány jevy, které se v jednotlivých částech štěrby mohou objevit. Pokud nebude uvedeno jinak, tak popsané jevy jsou společné jak pro nemagnetické, tak i pro MR kapaliny.

Po vstupu kapaliny do štěrby není rychlostní profil ještě vytvořen a je přítomen pouze pístový profil. K jeho tvorbě dochází postupně během průchodu kapaliny štěrbinou. Pro laminární proudění má plně vyvinutý rychlostní profil tvar paraboly.



Obrázek 2-21 Schematické znázornění štěrby

Místní tlakové ztráty štěrbin

Během protlačení kapaliny štěrbinou na slit-flow reometru je štěrbina výrazným zdrojem tlakových ztrát. Tyto ztráty jsou způsobené jak náhlým zmenšením průřezu při přechodu kapaliny z válce do štěrbin, tak také samotnou štěrbinou, ve které kapalina proudí vysokou rychlostí. Obecně při proudění reálných kapalin vznikají ztráty vlivem tření mezi molekulami kapaliny, v jehož důsledku dochází také k jejímu ohřevu [18]. Rozeznávají se dva druhy ztrát – místní a délkové. Jako místní ztráty lze označit zejména vstupní oblast štěrbin (viz Obrázek 2-21, interval 1-2) a výstupní oblast štěrbin (viz Obrázek 2-21, bod 4), délkové ztráty vznikají ve zbývajících oblastech.

Délkové ztráty jsou způsobeny třením proudící kapaliny o stěnu potrubí. Hodnotu ztrátového součinitele ξ_l je možné spočítat podle rovnice (2-6). Je vidět, že ztrátový součinitel ξ_l je přímo úměrný poměru délky počítaného úseku l_u s průměrem potrubí D vynásobeného třecím součinitelem λ . Jelikož měření musí být prováděna v oblasti laminárního proudění, je závislost třecího součinitele λ ve štěrbině obdélníkového průřezu lineární a je možné ho snadno spočítat podle rovnice (2-7) [11].

$$\xi_l = \lambda \frac{l_u}{D} \quad (2-6)$$

kde ξ_l je ztrátový součinitel třecích ztrát, λ je třecí součinitel kapaliny o stěnu potrubí, l_u je délka počítaného úseku v m, D je průměr potrubí v m.

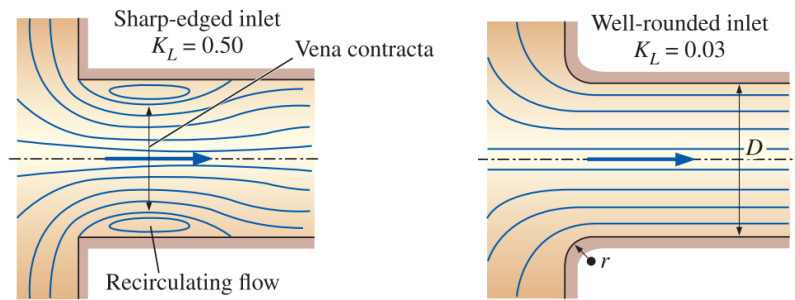
$$\lambda = \frac{96}{Re} \quad (2-7)$$

kde λ je třecí součinitel kapaliny o stěnu potrubí a Re je Reynoldsovo číslo.

Místní ztráty jsou způsobené charakterem proudění v místech se změnou průřezu potrubí nebo se změnou směru proudění. V těchto místech totiž dochází k víření, které tyto ztráty způsobuje. Pro standardní prvky, např. kolena a T spojky, je možné brát hodnotu součinitele místních ztrát z tabulek. U nestandardních prvků se musí určit experimentálně, protože složitost jevů vyskytujících se v daném místě znemožňuje teoretické určení [21].

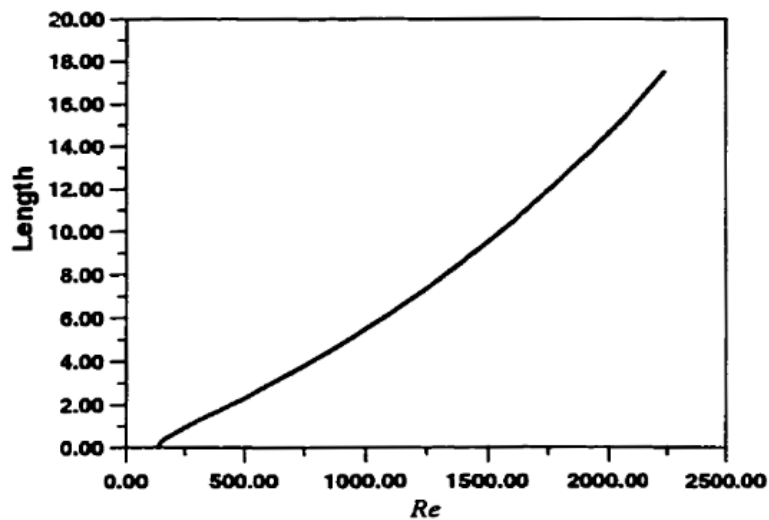
Ve vstupní a výstupní oblasti štěrbin vzniká víření kvůli ostrému přechodu z jednoho průřezu na druhý [11] (z průřezu válce na průřez štěrbin, popř. opačně). Důvodem k tomu je fakt, že kapalina nemůže v momentě prudce změnit směr proudění, proto dojde k odtržení proudu od stěn a vznikají víry.

Ve vstupní oblasti štěrbin tyto víry způsobují lokální zúžení průtočné plochy, které je označováno jako **vena contracta** (viz Obrázek 2-22 vlevo). Kvůli tomuto zúžení zde lokálně vzroste rychlost, což způsobuje další přírůstek tlakových ztrát.



Obrázek 2-22 *Vlevo*: vznik víření ve štěrbině za ostrým přechodem, *vpravo*: hladký přechod [11]

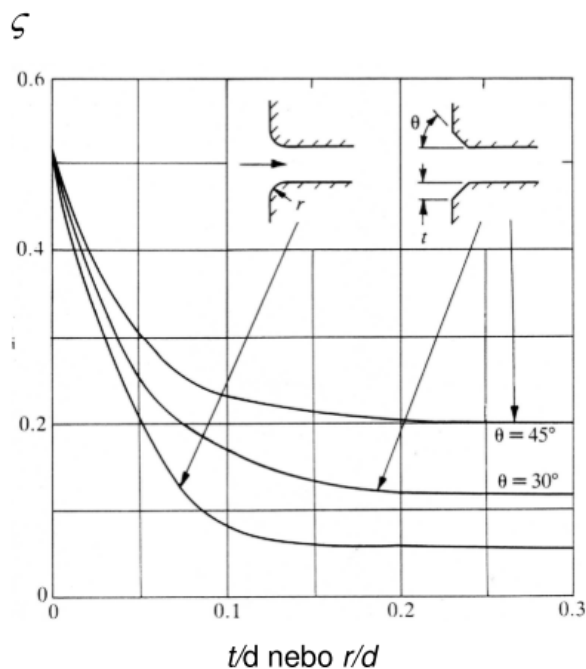
Délka vstupní oblasti s vířením se s rostoucím Reynoldsovým číslem zvětšuje [22]. Při velmi nízkých hodnotách Reynoldsova čísla naopak tato oblast vůbec nemusí vzniknout – viz Obrázek 2-23. Tato závislost vznikla pro štěrbinu s ostrou hranou. Je možné předpokládat, že při zaoblení hran bude průběh podobný s tím rozdílem, že se víření objeví až při vyšších hodnotách Reynoldsova čísla.



Obrázek 2-23 Závislost délky oblasti "Vena contracta" na Reynoldsově čísle [22]

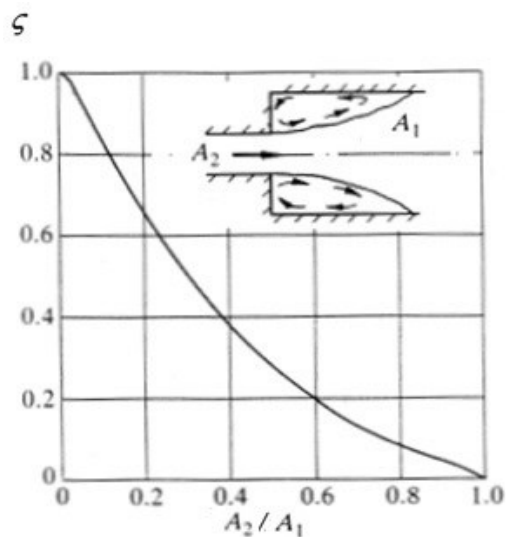
Vstupní oblast štěrbiny je na druhé a třetí evoluci slit-flow reometru provedena s ostrým přechodem. Použitím hladkého přechodu se zaoblenými hranami k tomuto jevu nedojde – viz Obrázek 2-22 vpravo. Autor používá pro ztrátový součinitel místních ztrát označení K_L , při srovnání ostrého a hladkého přechodu je vidět jeho výrazný pokles.

Vliv rádiusu na velikost vtokových ztrát je možné graficky znázornit jako poměr právě tohoto rádiusu r s průměrem d – viz Obrázek 2-24. Jelikož štěrbinu má obdélníkový průřez, musí se pracovat s ekvivalentním hydraulickým průměrem d_h (viz rovnice (2-5)). Je patrné, že od určité hodnoty tohoto poměru už má ztrátový součinitel konstantní velikost.



Obrázek 2-24 Vliv rádiusu na velikost místního ztrátového součinitele [23]

Při výtoku kapaliny ze štěrbin je velikost ztrátového součinitele dána pouze poměrem ploch – viz Obrázek 2-25. Není možné dohledat, jaký vliv na výtoku bude mít rádius. Vzhledem ke konstrukci reometru nemá ani smysl uvažovat pozvolné rozšíření průřezu – tzv. difuzor. Aby tento difuzor měl pozitivní vliv na pokles součinitele místních ztrát na výtoku, výrazně by vzrostly rozměry reometru, protože by toto rozšiřování muselo být pozvolné.



Obrázek 2-25 Závislost ztrátového součinitele na výtoku ze štěrbin [23]

V literatuře [21] je možné dohledat vztah pro výpočet součinitele místních ztrát na výtoku, který je také založen pouze na poměru ploch štěrbin a válce – viz rovnice (2-8).

$$\xi_v = \left(1 - \frac{S_g}{S_v}\right)^2 \quad (2-8)$$

kde ζ_v je součinitel místních ztrát na výtoku, S_ξ je plocha průřezu štěrbin v m^2 a S_v je plocha průřezu válce v m^2 .

Jakmile je určený ztrátový součinitel buď pro místní, nebo pro délkové ztráty, použije se pro výpočet ztrátové měrné energie Y_z Darcy-Weisbochův vztah – viz rovnice (2-9). S takto spočítanou hodnotou je možné dále pracovat v Bernoulliho rovnici.

$$Y_z = \xi_{v,l} \frac{v_v^2}{2} \quad (2-9)$$

kde Y_z je ztrátová měrná energie v J/kg , $\xi_{v,l}$ je ztrátový součinitel třecích ztrát resp. výtokových ztrát a v_v je vztažná střední rychlost kapaliny v m/s .

Pro případ proudění kapaliny v reometru, kdy zdrojem místních ztrát je prudká změna průřezu průtočné plochy, Darcy-Weisbochův vztah není vhodný. Je totiž problematické určit velikost vztažné rychlosti [19]. Proto je výhodnější místní ztráty počítat podle rovnice (2-10), protože průtok Q je ve všech místech konstantní.

$$Y_z = K_z Q^2 \quad (2-10)$$

kde Y_z je ztrátová měrná energie v J/kg , K_z je výsledná ztrátová konstanta daného systému v m^{-4} a Q je celkový průtok v daném systému v m^3/s .

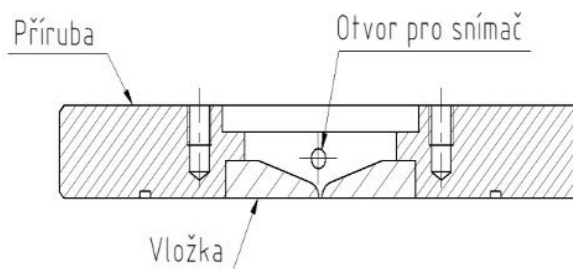
Průřez válce S_v je výrazně větší než průřez štěrbin S_ξ . Kvůli tomu rychlost proudění kapaliny ve štěrbině v_ξ velmi vzroste oproti původní rychlosti proudění ve válci v_v – viz rovnice (2-11). Při současné geometrii reometru, kdy průměr válce je 32 mm a rozměry štěrbin jsou 50 x 0,6 mm, je poměr jejich ploch S_v/S_ξ roven téměř 27. Rychlost proudění ve štěrbině je tedy podle rovnice (2-11) téměř 27x větší než rychlost pístu. Jak je patrné v rovnici (2-9), ztrátová měrná energie roste s druhou mocninou průměrné rychlosti. Samotná štěrbina je tedy také výrazným zdrojem místních ztrát kvůli vysoké rychlosti proudící kapaliny. Kapalina se v průběhu měření zahřívá vlivem ztrát, čímž se mění i její viskozita.

$$v_\xi = v_v \cdot \frac{S_v}{S_\xi} \quad (2-11)$$

kde v_ξ je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s , v_v je střední rychlost kapaliny ve válci v m/s , S_v je plocha průřezu válce v m^2 a S_ξ je plocha průřezu štěrbin v m^2 .

Není známo, jak velký vliv má velikost místních tlakových ztrát na vtoku a výtoku ze štěrbin na naměřené hodnoty tlakového spádu ve slit-flow reometru. Je však jasné, že tyto ztráty ovlivňují velikost naměřeného tlakového spádu a tím i jednu ze vstupních hodnot do vyhodnocovacího systému.

Aby bylo možné posoudit velikost vlivu tlakových vtokových ztrát na naměřené hodnoty tlakového spádu, byly v rámci jiné práce [13] přibližně koncepčně navrženy tvarované vložky v přírubách na obou stranách štěrbiny – viz Obrázek 2-26. Jejich úkolem je minimalizovat tyto tlakové vtokové ztráty. Návrh vložek bude v rámci téhle práce konstrukčně dokončen a vložky budou implementovány do vyvíjeného reometru.

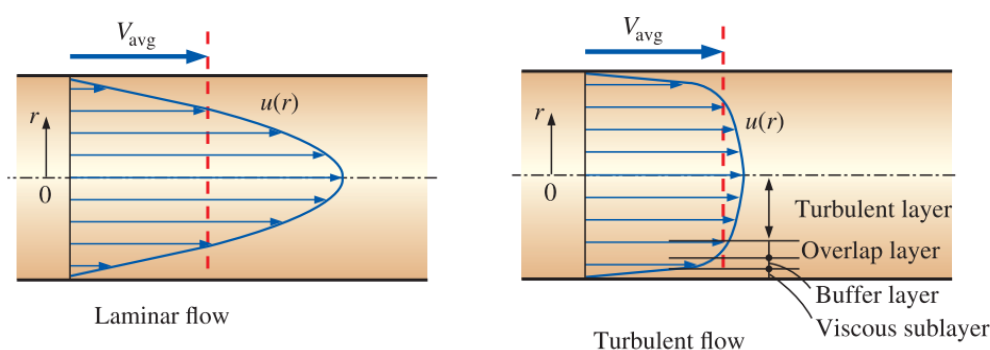


Obrázek 2-26 Koncepce vložek před štěrbinou [13]

Výše popsané jevy souvisí především s nemagnetickými kapalinami bez meze toku. V případě kapaliny s mezí toku (zde je možné zařadit i MR kapaliny) je nutné počítat s tím, že se ve střední části štěrbiny objeví tuhé jádro v důsledku poklesu smykového napětí pod mez toku. V tomto případě se mohou dané závislosti lišit, avšak popsané jevy na vstupu do štěrbiny a na výstupu z ní budou přítomny.

Tvorba rychlostního profilu

Po vstupu kapaliny do prostoru štěrbiny dochází hned za vířením v její vstupní oblasti k dalšímu jevu – tvorbě rychlostního profilu (Obrázek 2-21, oblast 2-3). Rychlostní profil vzniká z pístového profilu díky tření, které je v kapalině a také díky tření mezi kapalinou a stěnou štěrbiny [11]. Pro laminární proudění má plně vyvinutý rychlostní profil tvar paraboly – viz Obrázek 2-27 vlevo. U turbulentního proudění je rychlostní profil výrazně zploštěn – viz Obrázek 2-27 vpravo.



Obrázek 2-27 Vlevo: plně vyvinuté laminární proudění, vpravo: plně vyvinuté turbulentní proudění [11]

Rychlostní profil nevznikne okamžitě, k jeho vytvoření dochází postupně při proudění kapaliny po jejím vtoku do štěrbiny. Délka, která je potřebná pro vytvoření stabilního rychlostního profilu, se nazývá stabilizační délka a v téhle práci bude označována jako l_{stab} . Pro znázorněné rychlostní profily platí předpoklad, že v místě kontaktu kapaliny se stěnou potrubí je rychlost kapaliny nulová, tzn. není zde přítomný skluz.

Jako laminární proudění je označováno proudění, při kterém nevznikají žádné víry v průtočné ploše. Oproti tomu v turbulentním proudění dochází k migraci molekul kapalin po průřezu. Dochází tak mezi nimi k přenosu kinetické energie, díky čemuž je rychlostní profil více zploštělý. Turbulentní proudění má v porovnání s laminárním prouděním větší hydraulické odpory [18].

Je potvrzeno [11], že při proudění kapaliny šterbinou je smykové napětí na stěně šterbiny největší v její vstupní oblasti. K jeho poklesu dochází postupně s tvorbou rychlostního profilu, a jakmile je rychlostní profil vytvořen a dál se nemění, hodnota smykového napětí se ustálí na konstantní hodnotě. Kvůli tomu může u krátkých šterbin dojít k výraznému ovlivnění průměrného smykového napětí, zatímco u dlouhých šterbin je tento vliv zanedbatelný. Smykové napětí totiž ovlivňuje velikost smykového spádu a smykový spád je dán derivací rychlostního profilu. V oblasti tvorby rychlostního profilu je tato derivace v místě kontaktu se stěnou největší, dále při vytvořeném rychlostním profilu je už konstantní.

Výpočet stabilizační délky je závislý na velikosti Reynoldsova čísla Re a hydraulickém průměru D_h [11, 18]. V závislosti na tom, jestli je proudění laminární nebo turbulentní, se rozlišují dva výpočty. Pro laminární proudění udává přibližnou stabilizační délku vztah (2-12) [11], popřípadě je možné v literatuře [18] dohledat i mírně odlišné vztahy. Rovnice (2-13) udává výpočet stabilizační délky pro laminární proudění podle Boussinesqua a rovnice (2-14) udává výpočet podle Schillera.

$$L_{stab,o} = 0,05R_e d_h \quad (2-12)$$

$$L_{stab,Boussinesq} = 0,065R_e d_h \quad (2-13)$$

$$L_{stab,Schiller} = 0,025R_e d_h \quad (2-14)$$

kde L_{stab} je stabilizační délka pro vytvoření rychlostního profilu v m, R_e je Reynoldsovo číslo a d_h je hydraulický průměr v m.

Stejně tak je možné dohledat více přibližných výpočtů stabilizační délky i pro turbulentní proudění [11, 18]. Přibližná stabilizační délka je dána vztahem (2-15), dále je ale možné dohledat výpočet podle Nikuradzeho – rovnice (2-16), popřípadě výpočet podle Kirstena – rovnice (2-17).

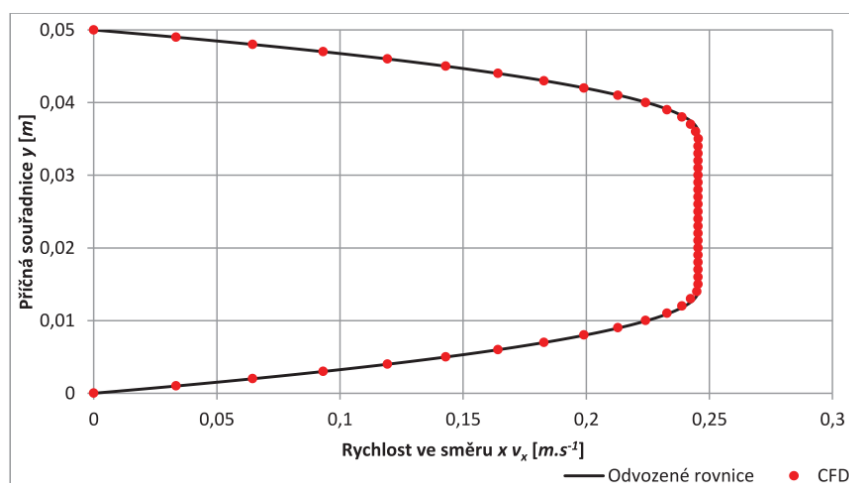
$$L_{stab,o} = 1,359R_e^{\frac{1}{4}} d_h \quad (2-15)$$

$$L_{stab,Nikurazde} = 50d_h \quad (2-16)$$

$$L_{stab,Kirsten} = 40d_h \quad (2-17)$$

kde L_{stab} je stabilizační délka pro vytvoření rychlostního profilu v m, R_e je Reynoldsovo číslo a d_h je hydraulický průměr v m.

Popsané jevy opět souvisí pouze s nemagnetickými kapalinami bez meze toku. V případě kapaliny s mezí toku (včetně MR kapalin) je proces stejný, akorát se zde opět objeví tuhé jádro ve střední oblasti štěrbin. Rychlostní profil při laminárním proudění tedy bude mít parabolický průběh pouze v oblasti, kde je kapalina tekutá – viz Obrázek 2-28. Pro určení stabilizační délky pro kapaliny s mezí toku nebylo možné dohledat žádné vztahy.

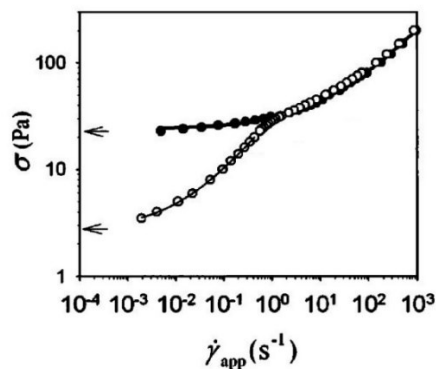


Obrázek 2-28 Rychlostní profil kapaliny s mezí toku při laminárním proudění [24]

2.3.2 Vliv drsnosti stěn štěrbin

Během proudění kapaliny štěrbinou se projevuje vliv její drsnosti zejména na skluz. Skluz nastane tehdy, když molekuly kapaliny v přímém kontaktu se stěnou nemají nulovou rychlost a po stěně kloužou. Platí při tom pravidlo, že skluz roste s klesající drsností stěny [25]. Naopak s rostoucí drsností stěn se skluz zmenšuje, ale zato mohou povrchové nerovnosti vyvolávat turbulentní proudění u stěn [13, 18].

Obrázek 2-29 znázorňuje experiment provedený na mikro gelové pastě při zkoušení dvou povrchů [25]. Jeden povrch byl velmi hladký, aby se skluz co nejvíce projevil. Druhý povrch byl zase drsný, takže se skluz potlačil a projevil se více vliv drsnosti stěn. V nízkých hodnotách smykového spádu je patrný výrazný pokles naměřeného napětí. Tento pokles se s rostoucím smykovým spádem zmenšuje až do bodu, kdy je rozdíl zanedbatelný. Skluz může být v některých aplikacích výhodný, protože při stejném smykovém napětí na stěně (tzn. při stejné hnací síle) bude vyšší průtok kapaliny.



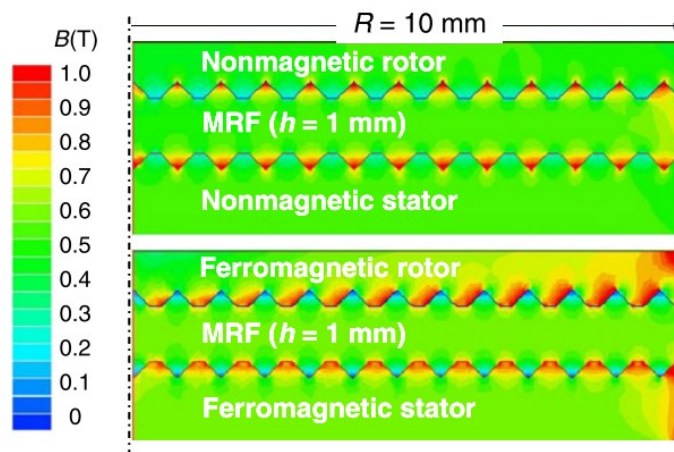
Obrázek 2-29 Porovnání hladkého a drsného povrchu, ● - drsný povrch (bez skluzu), ○ - hladký povrch (se skluzem) [25]

U MR kapalin je vliv skluzu stejný, jako u nemagnetických kapalin. Je prokázáno [26], že při velmi malé drsnosti vykazují MR kapaliny v aktivovaném stavu výrazně menší mez kluzu, než s větší drsností.

U vyšších drsností je popsán a potvrzen [27, 29, 31] tzv. efekt kotvy. Efekt kotvy je způsoben lokálními změnami v intenzitě magnetického toku – viz Obrázek 2-30.

U nemagnetických materiálů stěn je tento efekt nejvýraznější, protože lokální maxima magnetického toku jsou ve spodních částech povrchových nerovností. V těchto místech se začnou shlukovat ferromagnetické částice z MR kapaliny, které tam pevně drží. Díky tomu je interakce mezi stěnou a kapalinou větší než u hladkých stěn, což vede k vyšší mezi toku MR kapaliny. Při postupném zvyšování drsností povrchů se zjistilo [29], že u velkých drsností přestává mez toku růst a opět klesá. Na základě tohoto poznatku je možné tvrdit, že existuje ideální drsnost pro dosažení co největší meze toku.

Ferromagnetické materiály vykazují lokální maxima magnetického toku na horních částech nerovností. Rozdíl mezi povrchem s větší drsností a povrchem s menší drsností je zanedbatelný, materiál totiž sám o sobě účinně potlačuje skluz.

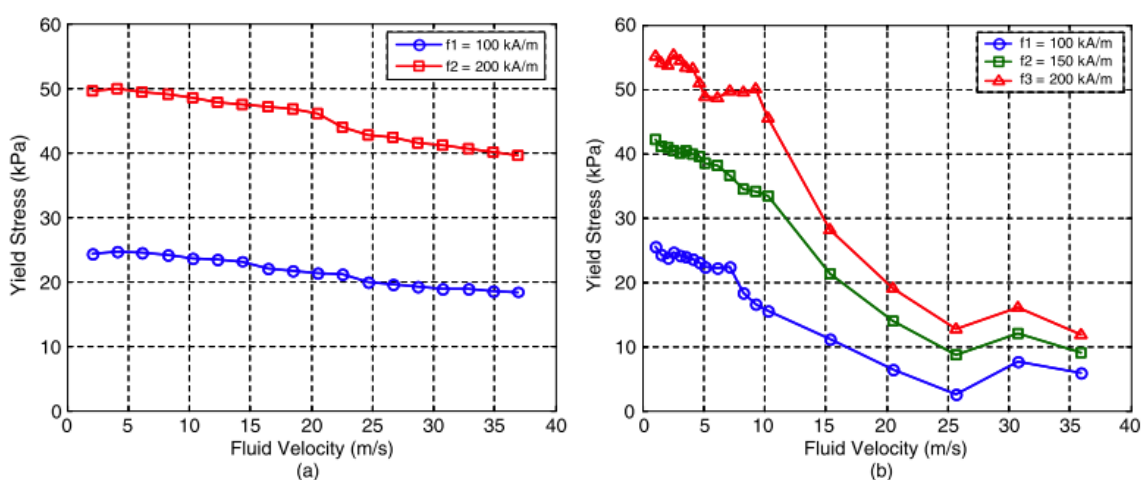


Obrázek 2-30 Simulace hustoty magnetického toku [29]

2.3.3 Délka aktivní zóny při měření MR kapalin

Při měření MR kapalin v aktivovaném stavu musí na kapalinu působit magnetické pole. Oblast, ve které na kapalinu působí magnetické pole, se nazývá aktivní zóna. Fernando Goncalves [7] se zabýval vlivem délky aktivní zóny na MR efekt ve vysokých smykových spádech. K experimentu použil reometr vlastní konstrukce (viz kapitola 2.1.3), který umožňoval použití dvou délek aktivní zóny – 25,4 mm a 6,35 mm.

U delší aktivní zóny se měřilo při intenzitě magnetického pole 100 kA/m a 200 kA/m, u kratší aktivní zóny byl rozsah stejný, ale ještě se navíc přidala střední hodnota 150 kA/m. Výsledek experimentu jasně ukazuje, že u kratší aktivní zóny dochází při vzrůstající rychlosti proudění k výraznému poklesu smykového napětí – viz Obrázek 2-31.



Obrázek 2-31 Závislost smykového napětí na rychlosti proudění, a) pro délku 25,4 mm, b) pro délku 6,35 mm [7]

Důvodem k takto výraznému poklesu smykového napětí je příliš krátká doba setrvání MR kapaliny v přítomnosti magnetického pole. Feromagnetické částice se totiž nestihnou úplně zřetězit a tím je MR efekt výrazně snížen. Kvůli tomu není plně využit potenciál MR kapaliny, čímž klesá dynamický rozsah zařízení. Doba setrvání MR kapaliny v přítomnosti magnetického pole má tedy zásadní vliv na MR efekt.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

V hydraulických zařízeních mohou během proudění kapalin vzniknout velmi vysoké smykové spády s hodnotami blízcími se až 10^6 s^{-1} . Komerčně dostupné reometry ale měří pouze v omezeném rozsahu smykových spádů a takto vysoké hodnoty nedokáží vytvořit. Řešením je právě konstrukce slit-flow reometru, který to dokáže. Díky tomu budou měření probíhat při reálných provozních podmínkách a naměřené hodnoty budou popisovat reálné chování kapaliny.

Velikost smykového spádu spolu s teplotou a viskozitou kapaliny jsou hlavní parametry, které mají vliv na naměřené výsledky (u MR kapalin navíc ještě intenzita magnetického pole). Teplota u všech druhů kapalin přímo ovlivňuje viskozitu. Ne-newtonské kapaliny mají obecně nelineární závislost smykového napětí na smykovém spádu a dělí se na více reologických modelů podle průběhu této závislosti. Právě kvůli této nelineární závislosti je měření ve velkém intervalu smykových spádů významné zejména pro ne-newtonské kapaliny. Naměřené výsledku dále ovlivňuje drsnost stěn, v případě MR kapalin navíc i materiál stěn štěrbin.

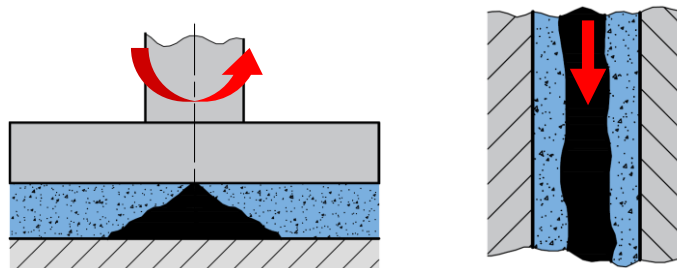
Nízké hodnoty dosažitelných smykových spádů u komerčně dostupných reometrů nejsou jejich jediné problémy. Další problémy vznikají při měření MR kapalin a jejich zdrojem je rotační pohyb, který vykonává měřící geometrie v těchto reometrech.

K zajištění homogenního magnetického pole ve vzorku MR kapaliny je možné použít pouze měřící geometrii typu disk-deska. Kvůli tomu není možné zajistit konstantní velikost smykového spádu v celém vzorku kapaliny. Smykový spád má maximální hodnotu na obvodu disku a směrem k ose rotace lineárně klesá, přičemž v ose rotace má nulovou hodnotu. Výrobci udávají maximální velikost smykového spádu odpovídající hodnotě na obvodu disku.

Jelikož není konstantní smykový spád, není konstantní ani smykové napětí na disku. Podstata měření u rotačních reometrů spočívá v měření velikosti odporového kroutícího momentu a jelikož smykové napětí na disku není konstantní, tak naměřené hodnoty jsou kvůli tomu zkresleny.

Vliv poklesu smykového napětí se dále projeví vznikem regionu tuhého jádra, které je charakteristické pro kapaliny s mezí toku. Jakmile totiž smykové napětí klesne pod mez toku, kapalina přestane být tekutá. Tento jev nastane i u MR kapalin v aktivovaném stavu. V průřezu vzorku kapaliny tato změna nastává postupně – viz Obrázek 3-1 vlevo. Jakmile totiž kapalina přestane být tekutá, zmenší tím vzdálenost mezi diskem a tímto tuhým jádrem, čímž dojde ke zvýšení smykového spádu a tím i smykového napětí. Je tedy vidět, že tuhé jádro směrem k ose rotace roste a tím postupně zmenšuje objem kapaliny v tekutém stavu. Kvůli tomu klesá možnost měřit vliv drsnosti stěn.

V případě MR kapalin v aktivovaném stavu může toto zmenšení způsobit, že částice rozptýlené v kapalině začnou ovlivňovat naměřená data. Další ovlivnění měření se může objevit u delších zkoušek v důsledku narušení homogenity vzorku kvůli odstředování feromagnetických částic v MR kapalině.



Obrázek 3-1 Vznik tuhého jádra u MR kapaliny; vlevo: možná podoba u rotačního reometru, vpravo: slit-flow reometr

Tuhé jádro vlivem poklesu smykového napětí samozřejmě vznikne i ve štěrbině slit-flow reometru (viz Obrázek 3-1 vpravo), jenže v porovnání s rotačním reometrem jsou zde rozdíly. Hlavním rozdílem je to, že tuhé jádro má přibližně konstantní tloušťku a objem kapaliny v tekutém stavu se proto nemění. Navíc tuhé jádro nebude v kontaktu se stěnami štěrbiny a bude se pohybovat ve směru toku kapaliny. Tím se podmínky měření více blíží podmínkám v MR tlumiči.

Díky měření při reálných provozních podmínkách budou naměřené tokové a viskozitní křivky popisovat reálné chování kapaliny. Slit-flow reometr podstatou své činnosti zajišťuje konstantní hodnotu smykového spádu na stěnách štěrbiny a nedochází tak ke zkreslení hodnot, jako u rotačních reometrů. Je proto možné říct, že pro konkrétní hodnotu smykového spádu existuje konkrétní hodnota napětí na stěně štěrbiny. Výsledky z měření proto bude možné dále použít v CFD simulacích pro dosažení přesnějších výsledků.

3.2 Analýza a zhodnocení rešerše

3.2.1 Reometry

Reometry dostupné na trhu nejsou vhodné pro měření MR kapalin především kvůli nízkým hodnotám dosažitelného smykového spádu a také kvůli zkreslování naměřených hodnot vlivem rotačního pohybu. Z výsledků měření není možné říct, že pro konkrétní hodnotu smykového spádu odpovídá konkrétní hodnota smykového napětí ve zkoumané kapalině, protože se jedná o zprůměrované hodnoty.

Společným znakem všech reometrů na trhu je využití Hallovy sondy pro měření magnetického pole ve štěrbině. Tento snímač ale nebude součástí nově navrhovaného reometru, protože na Ústavu konstruování se aplikuje jiný přístup. V magnetické štěrbině bez kapaliny se nejprve provedou měření závislosti magnetického pole na velikosti elektrického proudu v cívice a na základě těchto údajů se bude nakonec popisovat magnetické pole s MR kapalinou. Díky tomu odpadá vliv změny permeability MR kapaliny v závislosti na koncentraci feromagnetických částic.

Reometry vyvíjené v rámci výzkumu na univerzitách jsou založeny na principu protlačení kapaliny štěrbinou a jsou převážně modulární, aby se rozšířily možnosti výzkumu např. na zkoumání potřebné délky aktivní zóny u MR kapalin. Jejich společným rysem je použití lineárního aktuátoru pro protlačení kapaliny štěrbinou a dosahování vysokých hodnot smykových spádů.

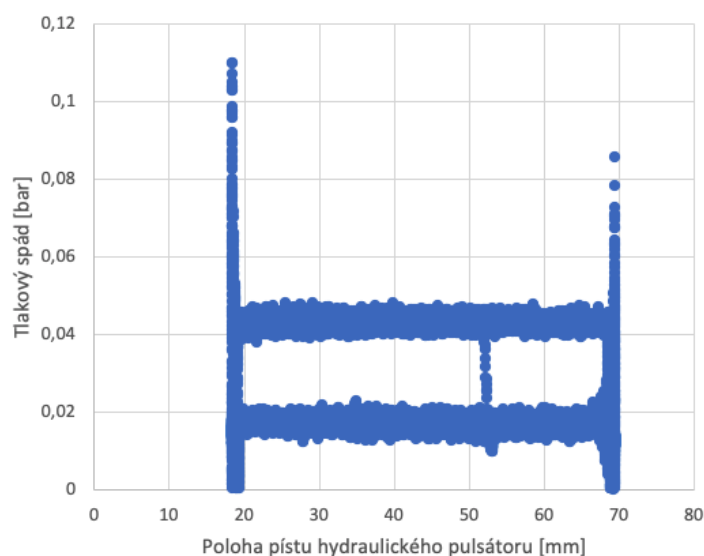
Celkem na Ústavu konstruování vznikly tři evoluce slit-flow reometru. S každou další evolucí se vyřešily nedostatky té předchozí a zároveň se objevily některé nové problematické oblasti. Na základě zkušeností z první evoluce reometru, kterou tvořil upravený automobilový tlumič, je nutné použít teploměr pro přesné měření teploty kapaliny. Ten se osvědčil už na následujících dvou evolucioních reometru. Stejně tak se na druhé a třetí evoluci osvědčila i patentovaná metoda vyhodnocení, která bude proto dále využívána. Pro přenos síly z lineárního aktuátoru na plovoucí písty je nejvýhodnější použít mechanickou vazbu. U vyvíjeného reometru bude dále zachována myšlenka tlačení plovoucích pístů, což zabrání možnému vzniku podtlaku v reometru, který by mohl způsobit nasátí vzduchu a následné znehodnocení měření.

Třetí evoluce slit-flow reometru se osvědčila, a proto z ní bude návrh nového reometru vycházet. Jako pohon bude dále sloužit hydraulický pulsátor Inova a celý návrh bude proveden na stávající konstrukci, která je součástí tohoto hydraulického pulsátoru. Zároveň bude brán v úvahu plán do budoucna na vytvoření stand-alone zařízení.

Na vyvíjeném reometru budou zachovány stejné rozměry válce, jako na třetí evoluci, aby bylo možné použít stávající plovoucí písty. Vyvíjený reometr bude dále umožňovat použití stejných senzorů tlaku a teploty, čímž se ušetří finance. Budou se ale zároveň uvažovat tlakoměry od stejného výrobce s různým měřicím rozsahem, které mají stejné přípojovací rozměry a bude je tak možné jednoduše vyměnit. Tlakoměry s vyšším rozsahem umožní použít vyšší hnací síly, naopak tlakoměry s nižším rozsahem poskytnou lepší detaily při měření v nižších tlacích, což pomůže rozšířit možnosti výzkumu.

Výrobce tlakoměrů udává [28] jejich dovolenou přetížitelnost při pokojové teplotě jako 175 % běžného provozního zatížení. Mezi pístnicí a pohonem reometru ale musí být vůle, která umožňuje tepelnou dilataci kapaliny. Právě po vymezení této vůle narazí rám pohonu do pístnice, což se projeví náhlým zvýšením tlaku na jedné straně reometru a to povede ke zvětšení tlakového spádu – viz Obrázek 3-2.

Tato lokální tlaková maxima závisí především na viskozitě kapaliny, průřezu štěrbinu a na rychlosti, při které dojde k nárazu po vymezení vůle. U MR kapalin navíc záleží ještě na velikosti magnetoreologického efektu při aktivovaném stavu kapaliny. Vzhledem k obtížné předvídatelnosti velikosti těchto maxim pro neznámé kapaliny bude pro menší riziko přetížení tlakoměrů vhodné zvolit součinitel bezpečnosti, který sníží maximální dovolený tlak při použití daného tlakoměru. Díky tomu se také sníží maximální dovolená síla, kterou bude vyvíjet lineární aktuátor a tato ponížená hodnota se nastaví jako limit pro vypnutí pohybu lineárního aktuátoru. Od okamžiku dosažení maximální síly do okamžiku vypnutí lineárního aktuátoru by tedy nemělo dojít k přetížení tlakoměrů, protože reakční doba systému je velmi malá.

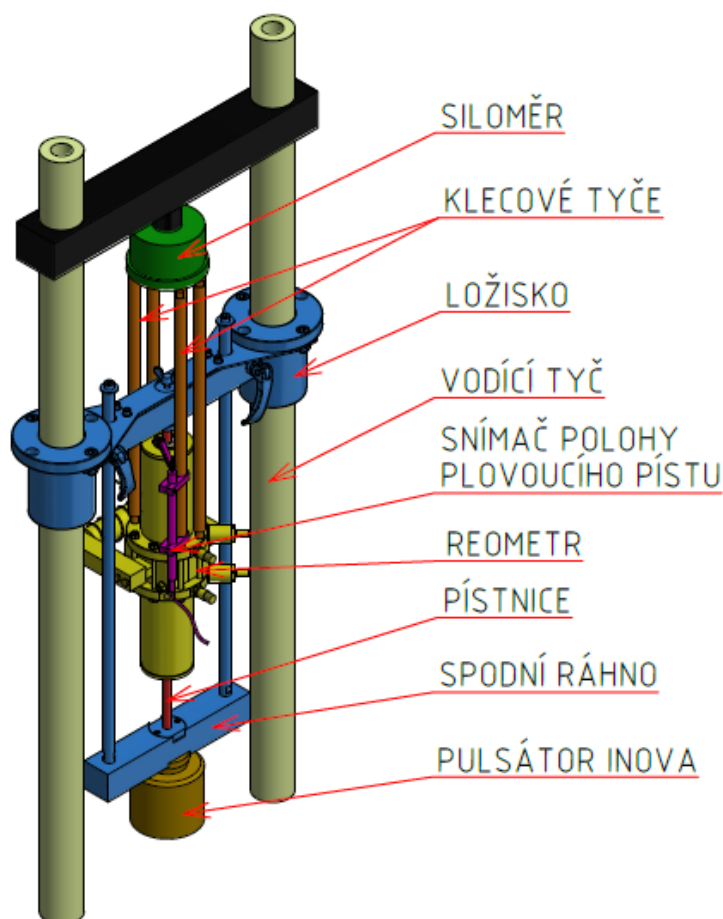


Obrázek 3-2 Tlakový spád z reálného měření na třetí evoluci slit-flow reometru

U vyvíjeného reometru bude zachována možnost měřit jak MR kapaliny, tak nemagnetické kapaliny od objemu 30 ml do objemu 100 ml. Pro oba typy kapaliny bude vyvinuto samostatné tělo obsahující štěrbinu, díky tomu dokáže reometr pracovat ve dvou konfiguracích. Na základě opotřebení současných štěrbin musí být nové štěrbinu tvořeny výměnnými vložkami, které umožní po opotřebování jednoduchou a levnou výměnu. Zároveň se rozšíří možnosti výzkumu, protože výměnné vložky umožní jednoduše měnit parametry štěrbinu. Bude možné zkoumat vliv drsnosti stěn, materiálu a různé tloušťky štěrbinu. Při výrobě vložek musí být zajištěno dosažení požadované geometrické přesnosti. Konstrukce reometru také umožní měnit délku štěrbinu. Výsledný reometr tak bude mít mnoho možných konfigurací.

Během výměny vzorku kapaliny se musí téměř celý reometr rozložit a následně složit. Tento proces komplikuje velké množství použitých šroubů na jednotlivých částech třetí evoluce slit-flow reometru (především uchycení válce k přírubě a uchycení reometru ke klecovým tyčím). Je proto vhodné pokusit se nový reometr co nejvíce zjednodušit, aby se proces urychlil. Při odvzdušňování navíc absence vhodných přípravků celý proces komplikuje a zhoršuje uživatelskou přívětivost. Je tedy nutné navrhnout a vyrobit potřebné přípravky.

Uchycení třetí evoluce slit-flow reometru v rámu hydraulického pulsátoru neposkytuje dostatečnou uživatelskou přívětivost. Při montáži nebo demontáži reometru proces připomíná známý hlavolam ježek v kleci a to především kvůli pevně uloženým pístnicím v kombinaci s klecovými tyčemi, na které je reometr upevněn – viz Obrázek 3-3.



Obrázek 3-3 Třetí evoluce slit-flow reometru v rámu hydraulického pulsátoru Inova

Při manipulaci s reometrem se musí dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k poškození vyčnívajících snímačů na reometru a stejně tak snímače polohy plovoucího pístu, který je upevněn na klecových tyčích. V ideálním případě by tak snímač polohy plovoucího pístu měl být umístěn tak, aby se nemohl při manipulaci s reometrem poškodit a zároveň aby byl přímo napojený na plovoucí píst.

Pro zlepšení uživatelské přívětivosti a odstranění rizika poškození snímačů během manipulace bude nutné navrhnout nový držák reometru. Na reometru se uvažuje použití různých délek štěrbin, proto se jim bude muset i držák snadno přizpůsobit, protože délka štěrbin přímo ovlivňuje výšku reometru.

Vlivem montážních a výrobních nepřesností je hydraulický pulsátor Inova v rámu vychýlen. To způsobuje také vychýlení rámu pohonu reometru, jehož poloha je pevně daná díky osazení pro píst ve spodním ráhnu. Jelikož jsou pístnice pevně spojeny s rámem pohonu reometru, tak dojde také k vychýlení pístnic. Důsledek tohoto faktu je ten, že zatížení reometru není rovnoměrné, protože není zatěžován ose. Pohon reometru tedy bude nutné upravit, aby zajišťoval zatížení v ose reometru bez ohledu na nepřesnosti v umístění hydraulického pulsátoru. Zároveň také musí být zachována možnost nastavit vůli mezi rámem a pístnicí, aby byla umožněna tepelná dilatace kapaliny, a také se musí pohon přizpůsobit různým objemům měřené kapaliny.

Návrhy nového držáku a pohonu reometru budou provedeny na stávající konstrukci s vodícími tyčemi, která je součástí pulsátoru Inova. Zároveň bude zohledněn plán do budoucna, kdy je cílem osamostatnit reometr od pulsátoru Inova a vyvinout tak tzv. standalone zařízení. Reometr, jeho uchycení a pohon by se tak ideálně měly pouze vložit do jiné konstrukce se samostatným pohonem.

Snímání polohy plovoucího pístu bude provedeno podobně jako u třetí evoluce pomocí lineárního potenciometrického snímače. Jeho ideální umístění je přímo na plovoucí píst bez dalších spojovacích prvků. Také by ideálně neměl nijak překážet během montáže a demontáže reometru. Tabulka 3-1 přehledně znázorňuje výhody a nevýhody jednotlivých evolucí slit-flow reometru vyvinutých na Ústavu konstruování.

Tabulka 3-1 Výhody a nevýhody jednotlivých evolucí reometru

Evoluce 1	Evoluce 2	Evoluce 3
+ reálná geometrie	+ metoda vyhodnocení výsledků	+ metoda vyhodnocení výsledků
+ trvanlivostní zkoušky MR kapalin	+ trvanlivostní zkoušky MR kapalin	+ trvanlivostní zkoušky MR kapalin
+ reálné provozní podmínky	+ měření teploty přímo ve štěrbině	+ měření teploty přímo ve štěrbině
+ temperační obvod	+ temperační obvod	+ temperační obvod
- parazitní jevy v naměřených hodnotách síly	+ možnost měřit různé objemy kapaliny	+ možnost měřit různé objemy kapaliny
- měření teploty	- velká a těžká konstrukce pohonu	+ pohon přes mechanickou vazbu
- nemá možnost měřit různé objemy kapaliny	- nelze použít víc délek štěrbin	+ lze použít víc délek štěrbin
	- sekundární hydraulický obvod	- absence přípravků pro odvzdušnění
	- nepřesné měření polohy plovoucího pístu	- dlouhá doba výměny vzorku
	- uživatelská přívětivost	- pevně spojený rám pohonu reometru s lineárním aktuátorem
		- uživatelská přívětivost

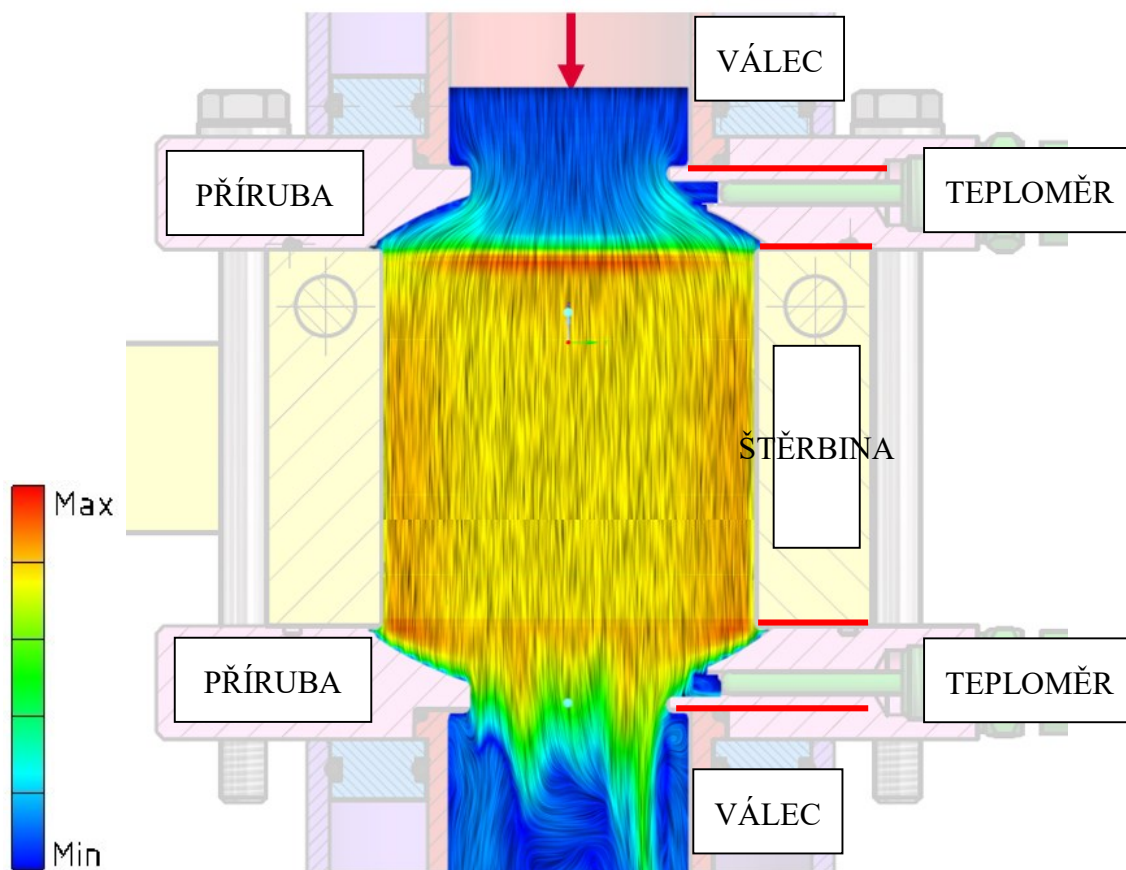
3.2.2 Průtok kapaliny štěrbinou

Štěrbina je klíčový prvek v měřicím řetězci a to, jak se v ní kapalina chová, přímo ovlivňuje velikost tlakového spádu. Během měření na předchozích evolucích slit-flow reometru se objevilo výrazné opotřebení štěrbin jak pro nemagnetické kapaliny, tak i pro MR kapaliny. Právě kvůli tomu musí být obě štěrbin tvořeny výměnnými vložkami, které bude možné po opotřebení jednoduše vyměnit a nebude tak nutné vyrábět celé tělo se štěrbinou znovu. Návrh vložek bude proveden tak, aby jejich výroba nebyla složitá a drahá. Výměnné vložky navíc rozšíří možnosti výzkumu, protože bude možné měnit drsnost stěn, tloušťku štěrbinu a materiál štěrbin. Zároveň bude možné při výrobě vložek dosáhnout potřebné přesnosti a stanovené drsnosti stěn s následným kontrolním měřením, což například u technologie elektroerozivního obrábění pro výrobu štěrbinu v nemagnetickém těle nebylo možné. Drát se při řezání rozkmital a tím ovlivnil přesnost výroby.

V případě nového magnetického obvodu, který už na ústavu prošel několika vývojovými kroky, to znamená, že se model bude muset ještě dále upravit, aby bylo možné používat v něm vložky k vytvoření štěrbinu. Tyto úpravy budou muset respektovat magnetický tok v geometrii. Materiál výměnných vložek u magnetického obvodu musí být magneticky měkký, aby si po vystavení magnetickému poli neuchoval zbytkový magnetismus.

Významné zdroje místních ztrát během protlačení kapaliny štěrbinou jsou na jejím vtoku a na jejím výtoku, kde dochází k prudké změně průřezu a tím i rychlosti proudění. Při měření se pravidelně střídají strany, ze kterých kapalina do štěrbinu vtéká. Díky stejné geometrii na obou stranách štěrbinu budou stejné vtokové a výtokové ztráty pro oba směry protlačování. Je možné ovlivnit pouze velikost vtokových ztrát, velikost výtokových ztrát totiž závisí na poměru ploch štěrbinu a válce.

Na třetí evoluci slit-flow reometru je vtok do štěrbinu na obou stranách s ostrým přechodem (viz Obrázek 1-1). Pro znázornění chování kapaliny proběhla simulace v programu Ansys Discovery Live Student 2019 R2, která znázorňuje průběh rychlosti proudící vody při 20 °C a při rychlosti pístu 0,2 m/s – viz Obrázek 3-4. Červená barva představuje oblasti s maximální rychlostí proudění, modrá barva zase oblasti s nejnižšími rychlostmi. Vzhledem k tomu, že geometrie v přírubách na vtoku do štěrbinu je na obou stranách stejná, budou také průběhy rychlostí stejné během protlačení kapaliny na druhou stranu.



Obrázek 3-4 Rychlost proudění ve šterbině, protlačení směrem dolů

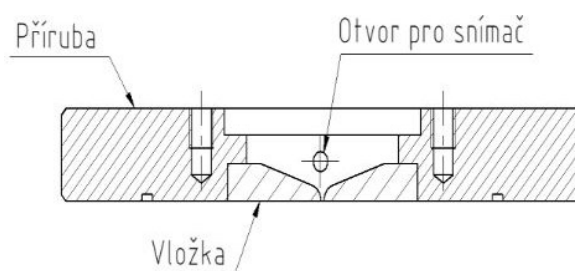
Při protlačení kapaliny šterbinou je patrný nárůst rychlosti v její vstupní oblasti. Nejvyšší hodnoty jsou zde soustředěny kolem středu a směrem k okrajům klesají. Tento jev způsobuje lokální zúžení průřezu šterbiny vlivem tzv. vena contracta (viz Obrázek 2-22), který zvětšuje místní ztráty na vtoku do šterbiny. V okrajích na vtoku do šterbiny tento jev není tak výrazný, protože je zde kapalina částečně navedena pomocí drážek v přírubě. Hluběji ve šterbině je vidět přibližně rovnoměrná rychlost proudění, což je pro měření žádoucí. Dále je ze simulace dobře vidět, že kapalina k teploměru zastrčenému v díře proudí minimálně. Proto musí být více vystrčen směrem k proudící kapalině, aby byla měření přesná.

V současnosti není známo, jak velký vliv mají vtokové a výtokové ztráty na naměřený tlakový spád. Tento vliv je ale důležité znát, aby bylo možné z naměřených dat přesně odečíst parametry odpovídající chování dané kapaliny bez vnesených vlivů od geometrie reometru. Na základě rešerše je patrné, že velikost místních ztrát je nejvíce závislá na rychlosti proudění kapaliny, dále na její hustotě a na součiniteli místních ztrát, který je dán především geometrií. Vyvinutý reometr by se proto měl otestovat s různými rychlostmi proudění kapaliny a s kapalinami o různé hustotě a viskozitě, aby bylo možné popsat vliv jeho geometrie na naměřená data.

Nový reometr proto bude mít na obou stranách štěrbinu tzv. vtoky. Jedná se o tvarované součásti, které minimalizují velikost vtokových tlakových ztrát. Minimalizace vtokových ztrát spočívá především ve zmenšení víření ve vstupní oblasti štěrbinu – tzv. vena contracta. Zároveň navíc budou zajišťovat konstantní rychlost proudění po celé šířce štěrbinu a díky menšímu víření se rychleji vyvine rychlostní profil, což je pro měření žádoucí. Výtokové ztráty závisí především na poměru ploch štěrbinu a válce, není je proto možné zmenšit.

Vtoky budou vyrobeny jako samostatné součásti, které budou usazeny v přírubách. Budou to tedy vložky, které bude možné podle potřeby měnit. Možnost jejich výměny je důležitá, protože budou přímo navazovat na štěrbinu, jejíž průřez bude možné díky výměnným vložkám měnit.

Je tedy nezbytné navázat na přibližný geometrický návrh z jiné práce (viz Obrázek 3-5), dokončit jeho konstrukční vývoj a implementovat ho do reometru. Kvůli vložkám bude dále vhodné změnit šířku štěrbinu. Místo dosavadních 50 mm tak bude použita štěrbinu široká 32 mm. Tento rozměr odpovídá vnitřnímu rozměru válce. Vložky na vtoku do štěrbinu tak budou menší a proto se pro ně bude muset v přírubě dělat menší díra.



Obrázek 3-5 Koncepce vložek před štěrbinou [13]

Plně vyvinutý rychlostní profil proudící kapaliny ve štěrbině poskytne konstantní hodnotu smykového napětí na stěně. Největší smykové napětí je ve vstupní oblasti štěrbinu, kde se rychlostní profil teprve vytváří. V této oblasti proto bude největší tlaková ztráta.

Na základě různých přístupů je možné přibližně určit stabilizační délku rychlostního profilu pro laminární proudění. Tyto přístupy neposkytují přesné řešení, protože se velmi liší a je možné, že díky vtokům na obou stranách štěrbinu bude stabilizační délka výrazně kratší. Kvůli největšímu poklesu smykového napětí ve vstupní oblasti štěrbinu musí reometr umožňovat použití různých délek štěrbin, zvolený rozsah délek je 5 – 50 mm.

Délka štěrbinu má další význam u MR kapalin. V případě slit-flow reometru určuje délka štěrbinu také délku aktivní zóny, tzn. zóny, ve které je přítomno magnetické pole. Pokud bude příliš malá, tak se feromagnetické částice nestihnou zřetězit a plně se nevyužije potenciál kapaliny, protože MR efekt bude oslaben. Pro magnetické tělo je tedy stejný požadavek, jako na nemagnetické – musí být možné na reometru použít magnetické tělo s různou délkou štěrbinu.

Další vliv na MR efekt má drsnost stěn a to především díky efektu kotvy, který se ale vyskytuje jenom u nemagnetických materiálů. I tak se s tímto jevem ale musí počítat a to například při testování různých materiálů stěn štěrbin při výzkumu odolnosti proti opotřebení. Tento jev je žádoucí, protože zvyšuje MR efekt. Vzniká zde tedy prostor pro výzkum ideální drsnosti stěn štěrbin, která nenaruší laminární proudění a zároveň poskytne největší efekt kotvy u MR kapalin.

Během proudění kapaliny ve štěrbině musí být přítomno pouze laminární proudění, protože je možné jej matematicky spolehlivě popsat. Na předpokladu laminárního proudění stojí odvozené reologické vztahy v patentované metodě vyhodnocení.

Na základě Reynoldsova čísla je možné jednoduše určit, v jakém režimu se proudění ve štěrbině nachází. Toto určení je nicméně pouze přibližné, protože vlivem příznivé geometrie může být proudění ve štěrbině laminární i při Reynoldsových číslech přesahující hranici 2300. Laminární proudění může dále ovlivnit například geometrie reometru, drsnost stěn štěrbin, druh kapaliny apod. Přesné určení přímo pro štěrbinu o dané drsnosti je možné určit pouze na základě měření.

Problematika narušení laminárního proudění příliš velkou drsností stěn se týká i nemagnetických kapalin. Při příliš malých drsnostech stěn štěrbin se může objevit skluz. Ten je v některých aplikacích výhodný, protože zajistí vyšší průtok kapaliny při stejné hnací síle. Je zde tedy prostor pro výzkum vhodné drsnosti stěn pro danou aplikaci. Díky výměnným vložkám štěrbin bude možné reometr jednoduše přizpůsobit potřebám měření.

3.2.3 Kapaliny

V závislosti na tvaru tokové křivky se rozlišují různé druhy kapalin. Pro návrh reometru budou uvažovány všechny typy kapalin – magnetoreologické a nemagnetické. Nebudou se uvažovat pouze suspenze s dispergovanými tuhými částicemi většími než desítky mikrometrů.

Magnetoreologické kapaliny významně mění své vlastnosti s rostoucí teplotou, velikostí smykového spádu, podle doby setrvání v magnetickém poli, podle intenzity magnetického pole a s délkou používání. Jejich složení je závislé na dané aplikaci a na provozních podmínkách. Životnost MR kapaliny ovlivňuje životnost celého zařízení, zátěžové zkoušky kapalin proto mají svůj velký význam. Koncepce slit-flow reometru umožňuje provádět zátěžové zkoušky pouhou změnou řídicího programu.

U nemagnetických kapalin se může sledovat mez toku, pokles nebo vzrůst viskozity v závislosti na smykovém spádu a také jak se jejich vlastnosti mění s časem. Díky tomu se můžou zjišťovat ideální provozní parametry pro zařízení, která například míchají různé kapaliny nebo nanášejí barvu.

V průběhu protlačování dochází vlivem ztrát k zahřívání testované kapaliny. Je proto potřeba umožnit kapalině tepelnou dilataci, aby nedošlo k nárůstu tlaku v reometru. Tepelná dilatace bude řešena stejně, jako u třetí evoluce slit-flow reometru pomocí nastavitelné vůle mezi pístnicí a rámem pohonu.

Po vyrobení reometru se budou muset provést kalibrační měření. Jejich cílem bude získat závislost místních ztrát na Reynoldsově čísle. Tyto místní ztráty vytváří geometrie reometru a od naměřeného celkového tlakového spádu je bude nutné odečíst, aby bylo možné získat parametry popisující chování kapaliny. Na základě rešerše je patrné, že velikost místních ztrát závisí především na rychlosti protlačování, dále ale také na typu kapaliny – především na její viskozitě a hustotě. Kvůli tomu bude nutné při kalibračních měření použít kapaliny s rozdílnými parametry.

3.3 Cíl práce

Cílem práce je vývoj a otestování čtvrté evoluce slit-flow reometru, který bude natolik univerzální, že umožní měřit reologické vlastnosti všech druhů kapalin (magnetických i nemagnetických) při vysokých smykových spádech (až 10^6 s^{-1}). Zařízení dále díky své modulárnosti umožní zkoumat vliv vtokových a výtokových ztrát, drsnosti stěn štěrbin, různých materiálů stěn štěrbin a také umožní měnit tloušťku štěrbin (zvolen rozsah 0,6 mm – 2 mm) a její délku (zvolen rozsah 5 mm – 50 mm), čímž se významně rozšíří možnosti výzkumu i pro velmi viskózní kapaliny. Možnost změny těchto parametrů prakticky není ničím omezena a bude je tak v budoucnu možné měnit i mimo předpokládané rozsahy. Součástí vývoje budou také další nezbytné prvky zařízení, jako rám pohonu reometru a jeho držák, které musí vydržet střídavé zatížení. Návrhy konstrukce budou ověřeny analyticky nebo numericky. Dále se budou navrhovat přípravky pro zjednodušení odvzdušňování reometru. Jako hnací jednotka se použije stávající pulsátor Inova s jeho dosavadní rámovou konstrukcí, zároveň bude při vývoji brán v úvahu budoucí plán používat slit-flow reometr jako tzv. standalone zařízení.

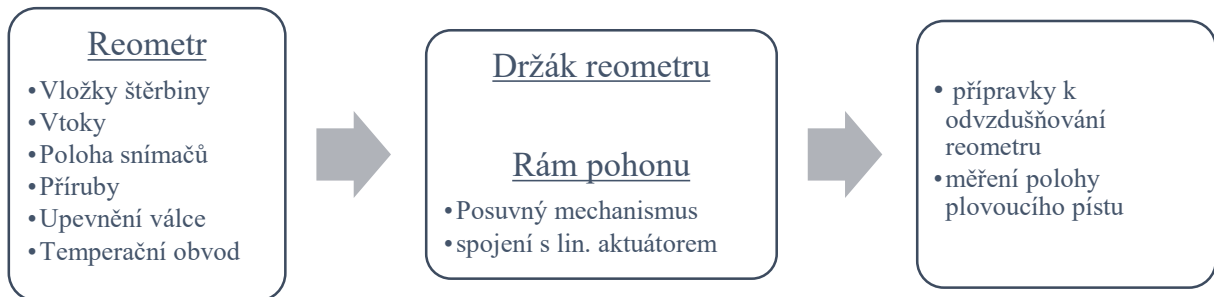
Dílčí cíle:

- Zajistit dobrou uživatelskou přívětivost zařízení
- Návrh vhodných přípravků pro usnadnění odvzdušňování reometru
- Zajistit působení síly v ose reometru
- Navrhnout vložky tvořící štěrbinu
- Minimalizovat vtokové ztráty do štěrbin
- Otestovat čtvrtou evoluci slit-flow reometru

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

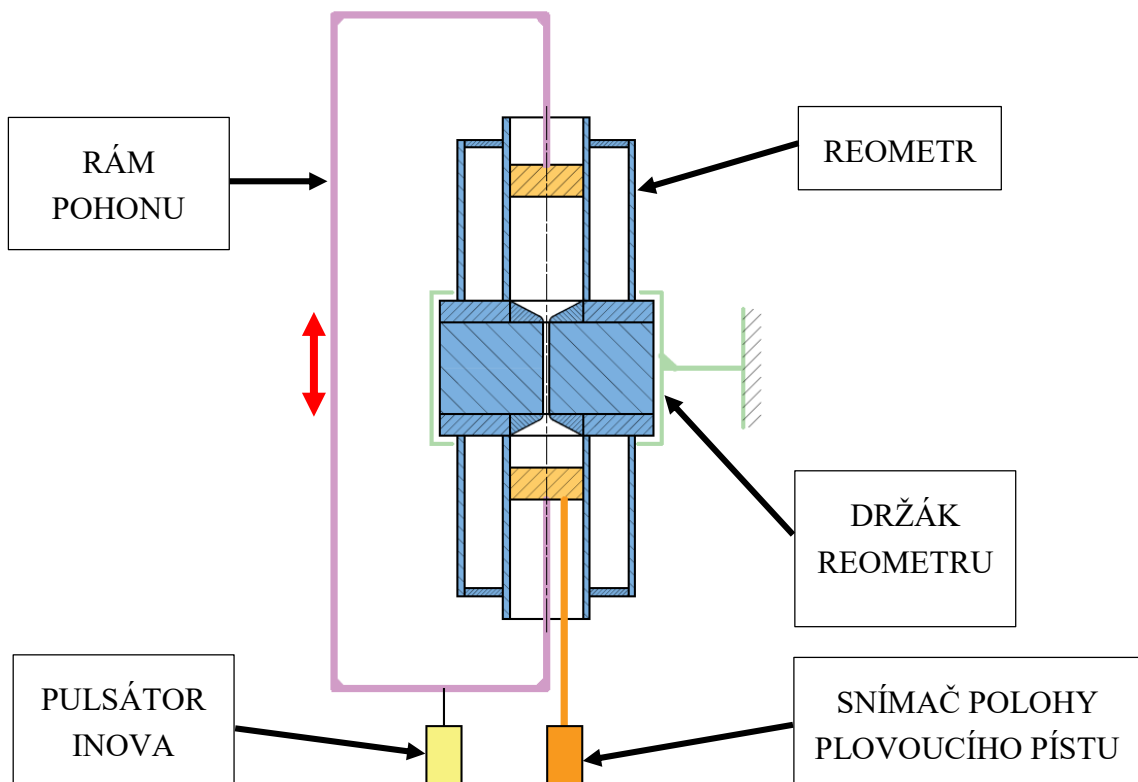
4.1 Postup řešení

Při řešení práce se postupovalo po jednotlivých konstrukčních uzlech. Nejprve se navrhoval samotný reometr a až poté se navrhoval jeho držák, rám pohonu a další prvky. Celý postup přehledně zobrazuje blokové schéma – viz Obrázek 4-1.



Obrázek 4-1 Blokové schéma postupu řešení

Obrázek 4-2 zobrazuje schéma celého zařízení se zvýrazněnými konstrukčními uzly. U reometru se při návrhu začínalo v jeho střední části – štěrbinou. Odtud se postupovalo po navazujících prvcích, které se navzájem ovlivňují.



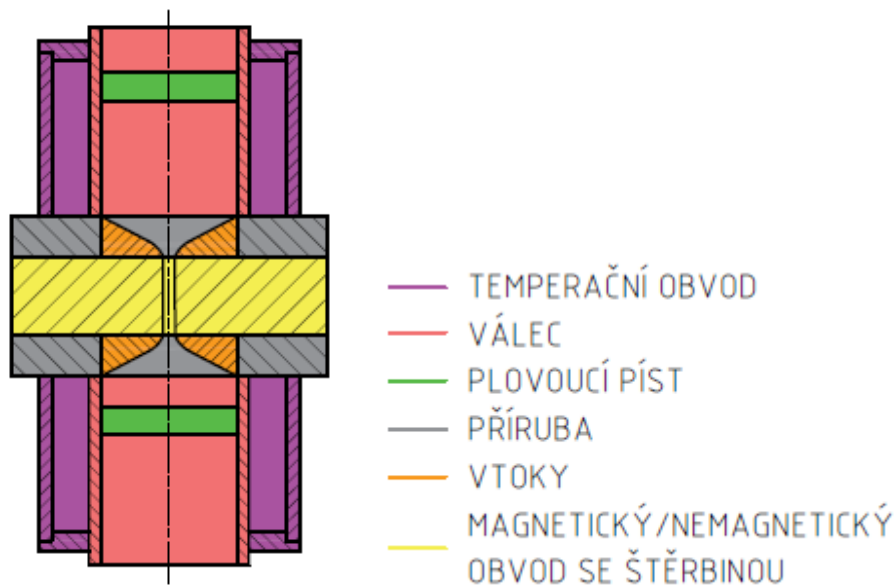
Obrázek 4-2 Schéma celého zařízení

Při návrhu držáku a rámu pohonu bylo nutné mít už představu o uspořádání jednotlivých prvků reometru a taky o jeho celkových rozměrech. Držák reometru zajišťuje jeho polohu během měření a rám pohonu slouží k přenosu síly z lineárního aktuátoru na plovoucí písty reometru. Držák i rám pohonu vzájemně ovlivňují svou geometrii, proto v závislosti na jejich prostorovém uspořádání vzniklo více variant.

Po navržení koncepčních variant těchto hlavních částí zbývalo navrhnout varianty měření polohy plovoucího pístu. Další konstrukční návrhy, jako například přípravky pro odvodu vzduchu reometru, vznikly díky své jednoduchosti bez koncepčních variant a byly proto umístěny rovnou do kapitoly 5.6 věnující se finálnímu konstrukčnímu řešení.

4.2 Reometr

Pořadí návrhů koncepčních variant jednotlivých konstrukčních uzlů reometru bylo provedeno v závislosti na návaznosti jednotlivých součástí. Obrázek 4-3 poskytuje přehledné schématické zobrazení jednotlivých částí reometru.



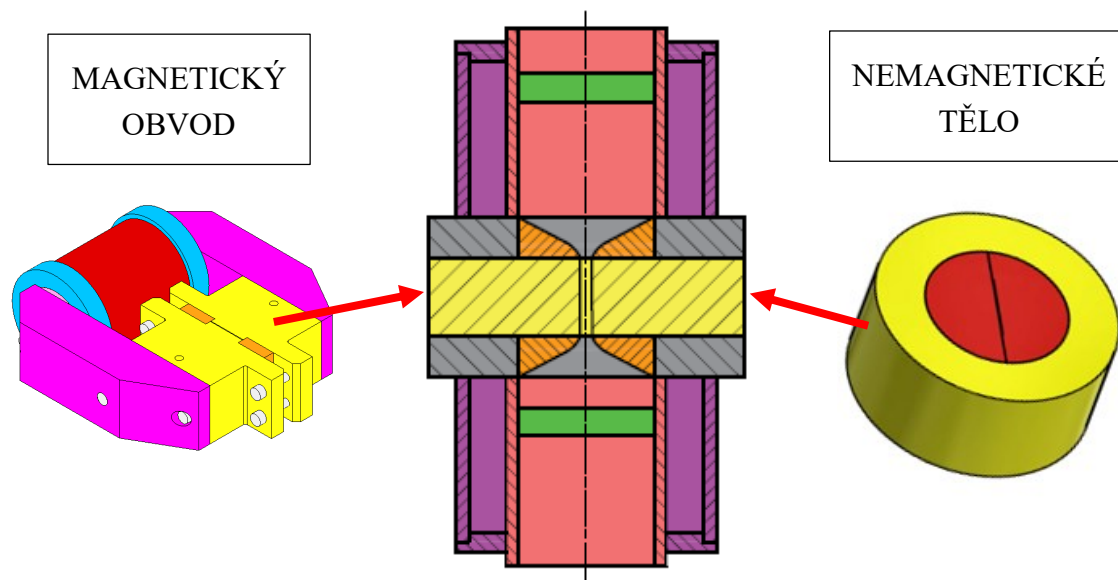
Obrázek 4-3 Schématické znázornění reometru v řezu s jednotlivými konstrukčními uzly

Nejprve se začínalo štěrbinou, která se nachází ve střední části reometru. Štěrbina je v nemagnetickém i magnetickém obvodu a koncepční návrhy jejího provedení s vložkami jsou rozvedeny v následujících podkapitolách. Štěrbina je hlavní prvek, který způsobuje vznik tlakového spádu během měření. Díky výměnným vložkám bude navíc možné měnit parametry štěrby (tloušťka, materiál a drsnost stěn).

Dalším konstrukčním uzlem byly vtoky uložené v přírubách, se kterými souvisí i orientace snímačů v reometru a geometrie obou přírub. Vtoky se nachází na obou stranách štěrbiny a jejich hlavním úkolem je minimalizace vtokových ztrát. Válec a temperační obvod jsou další prvky, které ovlivňují geometrii přírub a v následujících podkapitolách byly rozebrány způsoby jejich spojení s přírubou. Temperační obvod zajišťuje, aby kapalina ve válci reometru měla požadovanou teplotu.

4.2.1 Magnetický obvod a nemagnetické tělo se štěrbinou

Štěrbina je klíčový prvek slit-flow reometru, který zajišťuje vznik tlakového spádu během protlačení kapaliny. Vyvíjený slit-flow reometr umožňuje v závislosti na typu měřené kapaliny použít buď magnetický obvod, nebo nemagnetické tělo – viz Obrázek 4-4. Magnetický obvod dokáže ve své štěrbině vytvořit magnetické pole, a proto se používá pro měření MR kapalin.



Obrázek 4-4 Umístění magnetického a nemagnetického obvodu ve vyvíjeném reometru

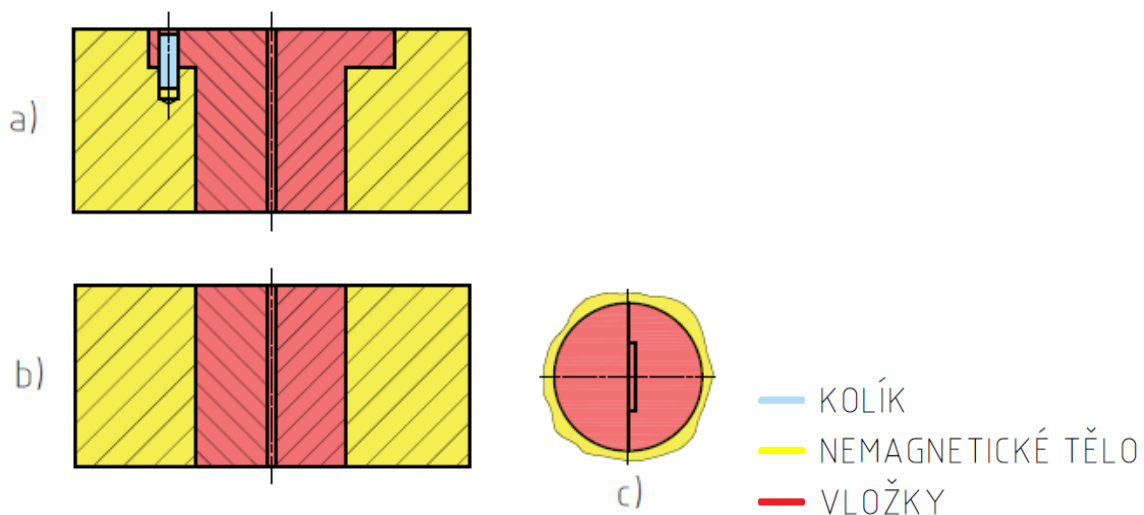
Stejně jako na předchozích evolucích slit-flow reometru, které vznikly na Ústavu konstruování, i tato evoluce bude mít štěrbinu obdélníkového průřezu. Díky tomu, že šířka štěrbiny je výrazně větší než její tloušťka, bude možné při vyhodnocování měření uvažovat pouze dominantní vliv dvou stěn štěrbiny.

Štěrbinu v magnetickém obvodu i v nemagnetickém těle budou tvořit tzv. vložky, které budou výměnné. Tato konstrukční úprava zajistí splnění požadovaných kritérií na změnu parametrů štěrbin (např. změnu drsnosti stěn, materiálu nebo změnu tloušťky štěrbin) a také ušetří náklady, protože při opotřebení bude stačit vyměnit jenom vložky a nebude potřeba vyrábět znovu celé tělo. Zároveň bude možné při výrobě vložek zvolit vhodnou technologii, která zajistí splnění požadavků na přesnost a drsnost povrchu, kterou bude možné po výrobě snadno změřit. Vložky bude možné v budoucnu vyrábět ve více kusech pro každé tělo (magnetické i nemagnetické), proto musí být navrženy tak, aby byly co nejjednodušší na výrobu. Magnetický obvod je určen pro MR kapaliny a dokáže ve své štěrbině vytvořit magnetické pole, z čehož plynou některé specifické konstrukční požadavky rozebrané dále.

Nemagnetické tělo

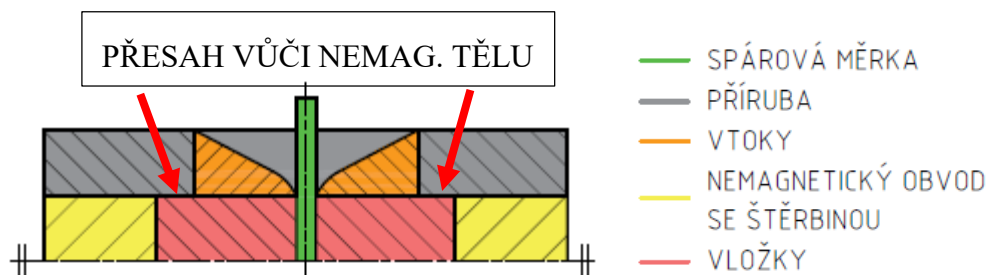
Pro měření nemagnetických kapalin bylo navrženo tzv. nemagnetické tělo. Jeho konstrukce s vložkami je velmi jednoduchá a umožňuje dva přístupy k řešení – viz Obrázek 4-5. Pro obě varianty je v těle díra, do které se vloží vložky.

V první variantě (Obrázek 4-5a)) je poloha vložek v nemagnetickém těle pevně daná pomocí kolíku. Kvůli tomu ale vložky musí mít osazení, které je vsazeno do zahloubení v těle. Díra pro jisticí kolík by se musela svrtat po složení, aby mezi oběma součástmi přesně navazovala. Stačilo by takto zajistit pouze jednu vložku. Druhá vložka se o ni opírá, takže by její poloha byla také daná. Díky tomu by se při montáži dalo vizuálně rozlišit, která vložka patří na kterou stranu těla. Ve druhé variantě (Obrázek 4-5b)) jsou vložky v těle volně a jejich poloha se při vkládání do nemagnetického těla bude muset ustavit.



Obrázek 4-5 Nemagnetické tělo; a) poloha vložek dána kolíkem, b) vložky vsunuty na volno, c) pohled z čelní strany

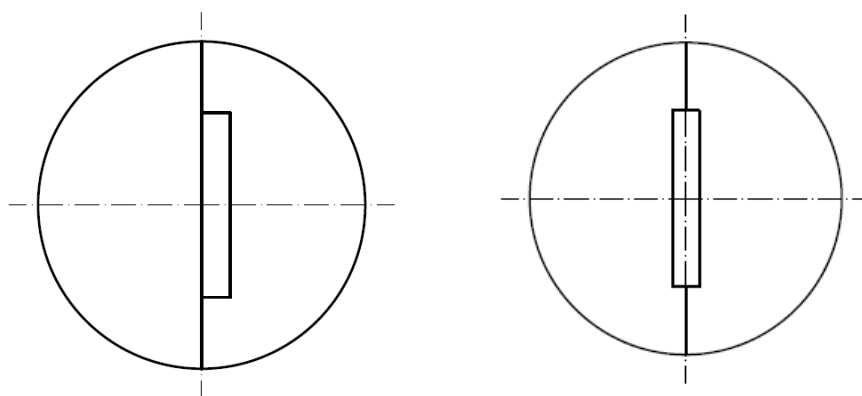
U obou variant se počítá s tím, že poloha přírub s vtoky vůči štěrbině se při montáži určí na základě párové měřky vsunuté do štěrbině – viz Obrázek 4-6. Díky ní bude možné přesně určit orientaci vtoků v přírubách, aby navazovaly na stěny štěrbin. Porovnáním obou variant je patrné, že ve variantě b) se díky absenci osazení a zahloubení zjednodušila výroba vložek i těla. Není ale možné jejich polohu pojistit kolíkem.



Obrázek 4-6 Skládání reometru s nemagnetickým obvodem

V obou představených variantách musí být vložky usazeny s minimální vůlí, aby se odstranily případné vzduchové kapsy, které by se těžko odzdušňovaly a na měření by se mohly projevit pružností. V axiálním směru musí být vložky usazeny zcela bez vůle, aby se během měření nemohly pohybovat ve směru toku kapaliny. Kvůli tomu musí mít přesah vůči nemagnetickému tělu, aby vložky byly při skládání reometru sevřeny mezi přírubami – viz Obrázek 4-6.

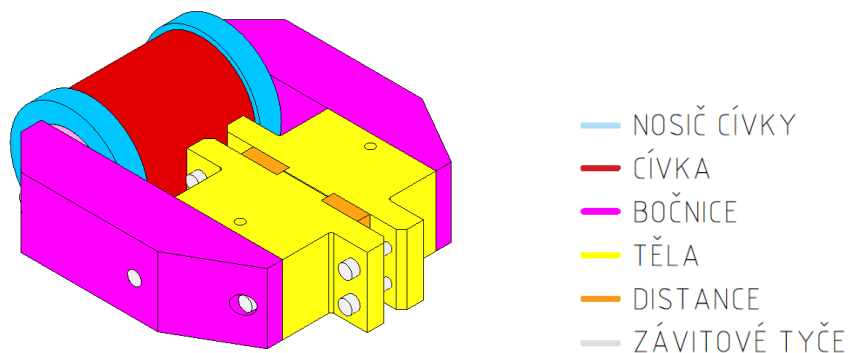
Obrázek 4-5c) poskytuje pohled ze spodní čelní strany na štěrbinu tvořenou vložkami. Tento pohled je u obou variant stejný. Provedení štěrbin pomocí vložek je možné koncepčně navrhnout jenom dvěma způsoby – viz Obrázek 4-7. První varianta zobrazená vlevo znázorňuje asymetrické provedení štěrbin, u kterého dělicí rovina prochází přímo jednou stěnou štěrbin. Díky tomu je možné určovat šířku a tloušťku štěrbin jenom jednou vložkou, ve které je drážka. Oproti tomu varianta vpravo zobrazuje symetrickou štěrbinu, u které dělicí rovina prochází středem štěrbin a drážka tak musí být vyrobena v obou polovinách vložek.



Obrázek 4-7 Provedení štěrbin; vlevo: asymetrická, vpravo: symetrická

Magnetický obvod

Magnetický obvod je určený pro MR kapaliny, protože ve štěrbině dokáže vytvořit magnetické pole. Jeho vývojem se už začal zabývat výzkumný tým z Ústavu konstruování a na základě simulací magnetického toku vznikla jeho geometrie – viz Obrázek 4-8. Tuto geometrii je potřeba dále upravit, aby bylo možné použít výměnné vložky k vytvoření štěrbin. Navržené řešení musí být aplikovatelné i na jiné délky štěrbin. Byla snaha co nejméně zasahovat do již navržené geometrie.

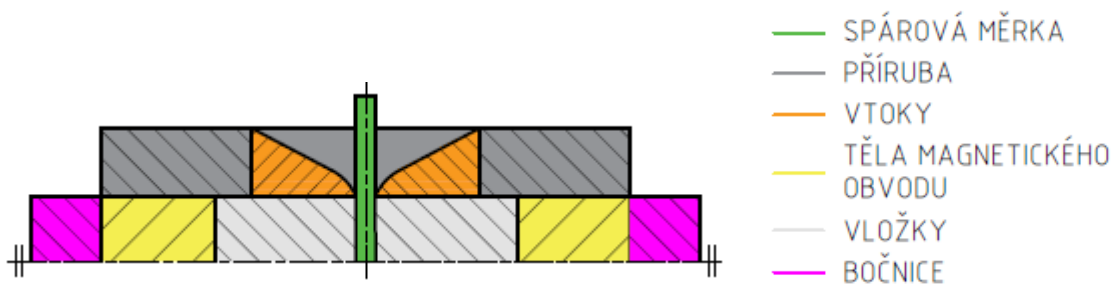


Obrázek 4-8 Původní návrh nového magnetického těla založený na simulacích magnetického toku

Celé magnetické tělo bude vyrobeno z magneticky měkkého materiálu (behanit). Díky tomu si jednotlivé části neudrží zbytkový magnetismus po přerušení přívodu napětí na cívku.

Hlavní myšlenka při návrhu magnetického obvodu je soustředit všechny magnetický tok pouze do prostoru štěrbin. Kvůli tomu musí být použity magneticky nevodivé materiály, aby odizolovaly obě těla obvodu. Jedná se zejména o závitové tyče, které slouží ke spojení dvou těl a pak také o distance mezi těly. Jako vhodné materiály pro tyto účely je možné použít buď bronz, mosaz nebo nerezovou nemagnetickou ocel.

Na magnetická těla z obou stran přiléhají příruby s vtoky (viz Obrázek 4-9), je proto nutné, aby tyto součásti byly vyrobeny také z magneticky nevodivého materiálu. Díky tomu nebude vznikat magnetický zkrat a magnetický tok bude soustředěn do prostoru štěrbin. U všech variant se předpokládá použití spárových měrek pro ustavení polohy vtoků s přírubou vůči štěrbině během skládání reometru (viz Obrázek 4-9).

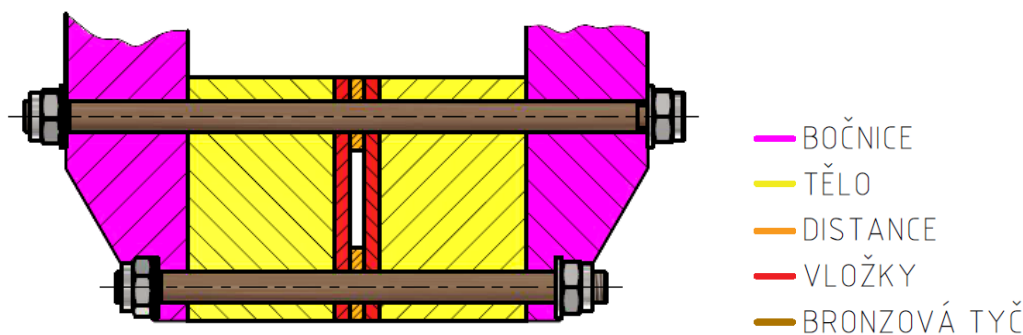


Obrázek 4-9 Skládání reometru s magnetickým obvodem

Při návrhu se muselo vyřešit několik problémů, které vznikly kvůli většímu počtu součástí v blízkosti štěrbin. Po výměně vložek je nutné mít zajištěnou polohu všech součástí, aby byla přesně dána tloušťka štěrbin. Samozřejmě bylo také nutné zajistit těsnost celé sestavy. Povrchy, na které dosedají příruby, budou broušeny, aby bylo možné k těsnění použít o-kroužek v přírubě, což je stejné provedení, jako na třetí evoluci slit-flow reometru. K těsnění mezi těly a distancemi bude použit tmel, popřípadě je ještě možné uvažovat jako variantu těsnění v tomto místě i tekuté těsnění. Tmel (popř. tekuté těsnění) bude použit pouze v místech, která se při běžném provozu nebudou rozebírat.

Varianta 1

Obrázek 4-10 znázorňuje první variantu úpravy magnetického obvodu s vložkami. Je vidět, že ke složení všech součástí slouží pouze dvě tyče. K zajištění přesné polohy všech součástí magnetického obvodu jsou na tyčích lícované válcové plochy. Geometrie samotných vložek je tak velice jednoduchá na výrobu a celý obvod je možné jednoduše složit. Otvory pro tyče by se musely vrtat skrz všechny součásti najednou, aby byly přesně.



Obrázek 4-10 Varianta magnetického těla s výměnnými vložkami

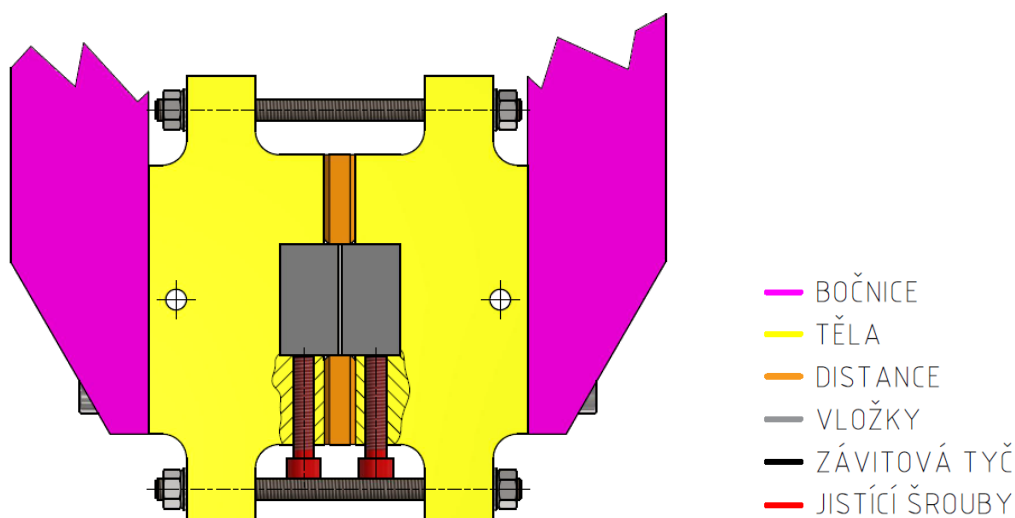
Tato varianta řeší všechny popsané problémy a zároveň výrazně nemění navrženou geometrii na základě simulací magnetického toku. Jediná změna je v tloušťce mosazné distance, která odpovídá tloušťce šterbiny. Pro změnu tloušťky šterbiny bude stačit vyměnit pouze mosazné distance, což je výrobně nejlevnější a nejjednodušší díl. Aby nedošlo ke změně šířky magnetického obvodu, musí se spolu s distancemi vyměnit i jedna vložka. Při svrtávání a následném broušení tak může být rovnou v magnetickém obvodu umístěno více tlouštěk těchto součástí, čímž se rovnou vyrobí součásti nutné pro změnu tloušťky šterbiny.

Výhodou této varianty je dodržení jednoduché geometrie jednotlivých součástí. Oproti tomu bude ale nutné během výměny vložek rozebrat celý magnetický obvod, což je komplikace.

Varianta 2

U varianty 1 se nepodařilo dodržet tloušťku navržených distančních plátek a návrh se tak vrátil do stavu, kdy jejich tloušťka odpovídá tloušťce šterbiny. Tento stav je totožný s provedením používaným na třetí evoluci slit-flow reometru.

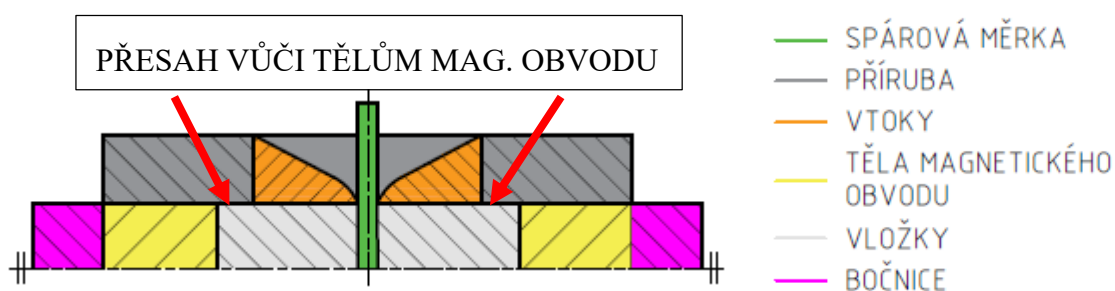
Při návrhu druhé varianty byla tedy zachována tloušťka mosazné distance, která byla použita při vývoji geometrie magnetického obvodu během simulací magnetického toku v jeho částech. Obrázek 4-11 poskytuje pohled na druhou variantu magnetického obvodu s výměnnými vložkami.



Obrázek 4-11 Druhá varianta magnetického obvodu

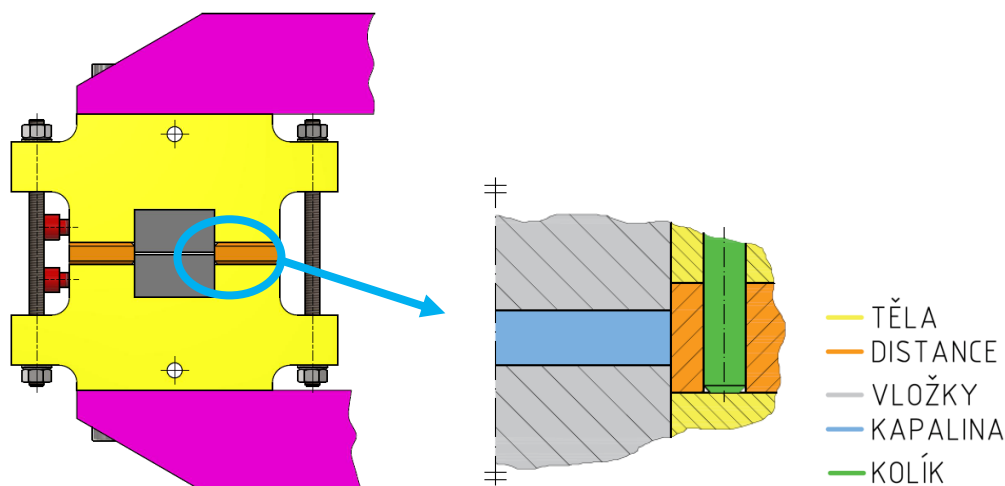
Vznikla na první pohled složitější geometrie obou těl, což je způsobeno drážkou pro vložky. Za to se ale podařilo zachovat jednoduchý tvar obou vložek, což je výhoda pro jejich výrobu, jelikož se budou podle potřeby vyrábět ve více kusech v závislosti na tloušťce štěrbiny nebo na drsnosti jejich stěn. Polohu vložek v tělech zajišťují šrouby.

Zajištění vložek šrouby je ale pouze pro manipulaci s magnetickým obvodem během skládání reometru. Při provozu budou zajištěny stejně jako u nemagnetického těla – budou mít vůči tělům malý přesah. Díky tomuto přesahu je zajistí z obou stran příruba reometru, které se na magnetický obvod přitáhnou (viz Obrázek 4-12) a během provozu při protlačení kapaliny tak bude zamezeno jejich pohybu. Aby nedocházelo k únikům zkoumané kapaliny skrz závit jisticích šroubů, musí se zatěsnit. To je možné vyřešit více způsoby – teflonová páska na závit, USIT kroužek pod hlavou šroubu, závitové těsnění.



Obrázek 4-12 Přesah vložek magnetického obvodu

Distance drží v jejich poloze mezi těly pouze tření a tmel (popř. tekuté těsnění), který slouží primárně k utěsnění. V případě potíží s tímto řešením bude možné do distancí a jednoho těla dodatečně vyvrtat díru a k jejich zajištění použít kolík – viz Obrázek 4-13. Tento kolík by musel být z magneticky nevodivého materiálu, aby nezpůsobil magnetický zkrat.

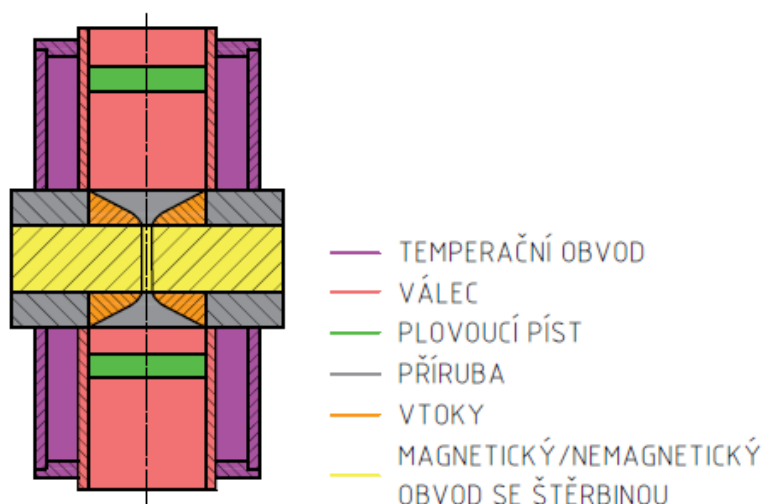


Obrázek 4-13 Varianta zajištění distance pomocí kolíku

Velkou výhodou u této varianty je to, že při výměně vložek se nemusí rozdělovat celý magnetický obvod, postačí pouze povolit jistící šrouby a vložky vysunout. Díky tomu se nemusí řešit požadavek na přesné složení, protože se magnetický obvod už nebude dále rozdělovat, jeho obroušené dosedací plochy pro příruby budou totiž neměnné.

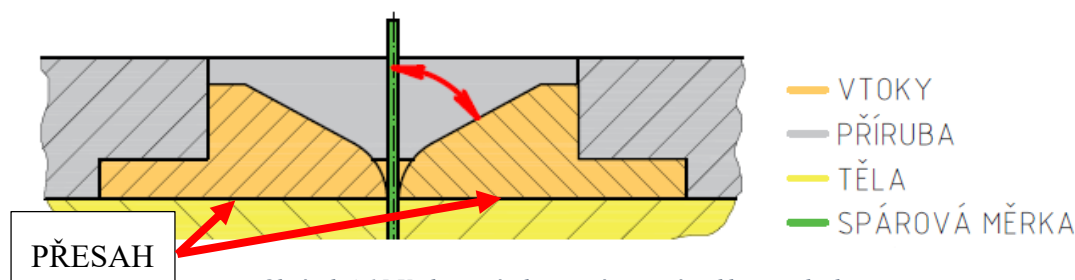
4.2.2 Vtoky

Geometrie vtoků reometru byla navržena pouze přibližně v jiné diplomové práci [13] zabývající se matematickým popisem proudění ve štěrbině. Tento návrh je nutné dále rozpracovat, implementovat je do reometru a konstrukčně zajistit důležité vlastnosti. Vtoky jsou umístěny na obou stranách štěrbiny – viz Obrázek 4-14. Jejich hlavním úkolem je minimalizovat vtokové tlakové ztráty.



Obrázek 4-14 Vtoky ve vyvíjeném slit-flow reometru

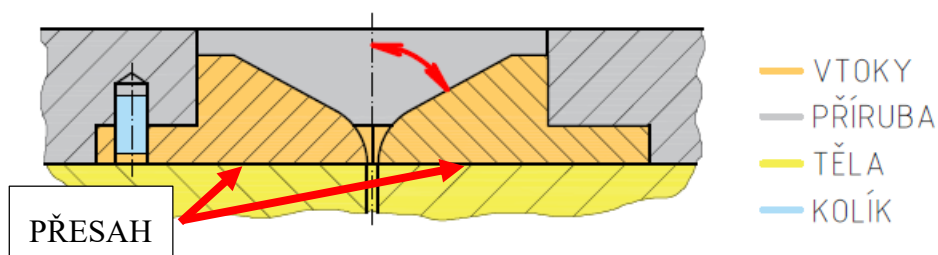
Již nyní je možné určit klíčové body konstrukce – viz Obrázek 4-15. Oba vtoky budou mít na své horní straně plochu, na kterou bude dosedat plovoucí píst reometru. Tato plocha bude fungovat jako jeho doraz. Dále přechod z vtoku do štěrbiny bude tvořit rádius, který má prokázaný příznivý vliv na minimalizaci vtokových ztrát a také zmenšuje turbulence ve vstupní oblasti štěrbiny (viz kapitola 2.3.1). Zároveň mezera mezi rádiusy na spodní ploše musí mít přesně daný rozměr, který se shoduje se štěrbinou tvořenou vložkami. V ideálním případě by tak rádius měl plynule navazovat na stěnu štěrbiny po celé její šířce.



Obrázek 4-15 Vtoky v přírubě se zvýrazněným sklonem plochy

Pro zajištění přesné polohy vtoků vůči přírubě poslouží zahloubení, do kterého se vtoky vloží – viz Obrázek 4-15. Opět je důležité, aby zde byly vůle co nejmenší, pomůže to totiž eliminovat malé vzduchové kapsy, které by se nemuselo podařit odstranit během odvzdušňování reometru. Na naměřených datech by se ale mohly projevit pružností, která by tato data ovlivnila.

K zabránění rotace vtoků v zahloubení příruby je možné použít kolík – viz Obrázek 4-16. Princip by byl tedy stejný, jako u zajištění vložek v nemagnetickém těle. Díky kolíku by byla orientace vtoků vzhledem k přírubě dána už při skládání reometru.



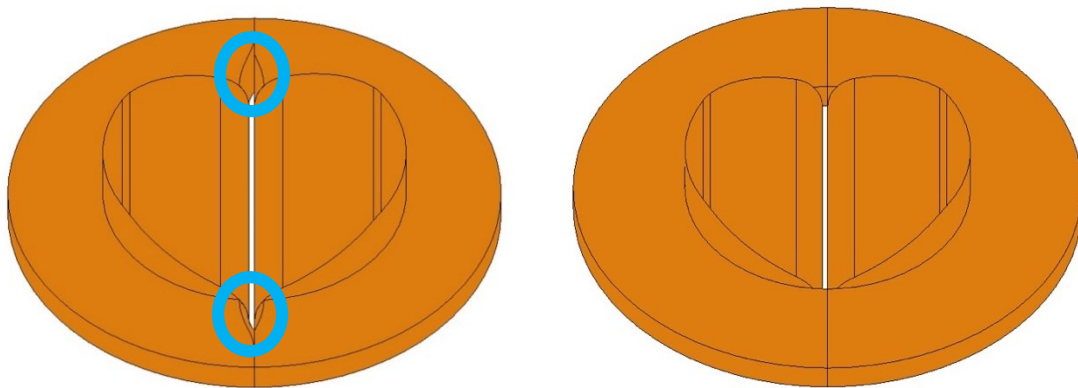
Obrázek 4-16 Poloha vtoků v přírubě jištěna kolíkem

Vhodnější je však provedení bez kolíků, kdy se pomocí spárové měrky vsunuté do štěrbiny ustaví jak poloha příruby, tak orientace vtoků – viz Obrázek 4-15. Vtoky musí mít vůči čelu příruby reometru přesah, aby byly po jeho složení sevřeny mezi přírubu a těla. Díky tomuto přesahu bude zamezeno pohybu vtoků ve směru toku kapaliny a zároveň se tak zajistí jejich poloha.

Sklon plochy vtoků (viz Obrázek 4-15 a Obrázek 4-16) se určil na základě CFD simulace pro konkrétní vybrané koncepční řešení v části Konstruktivní řešení – viz kapitola 5.3.2. Dále byl v této kapitole rozebrán problém výroby vtoků, na základě kterého vznikaly jednotlivé koncepce.

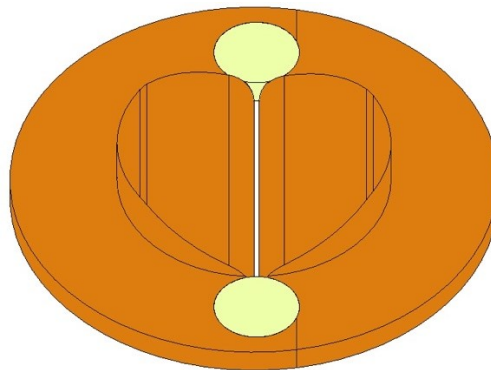
U vtoků je žádoucí hladký povrch především v oblasti, kde rádius směřuje proud kapaliny do štěrbin. Díky tomu nebude nijak přispívat k turbulencím v její vstupní oblasti. Proto se k výrobě uvažovalo použití rádiusové frézy, která je pro vytvoření požadovaného povrchu nejlepší.

Jenže vzniká problém v krajích štěrbin (viz Obrázek 4-17 vlevo – zvýrazněné oblasti), kde se fréza zařezává mimo požadovanou oblast. V případě použití asymetrické štěrbině navíc nejsou zářezy na obou polovinách stejné. Tato geometrická nedokonalost narušuje ideální tvar vtoků (viz Obrázek 4-17 vpravo) a může nepříznivě ovlivnit proudění ve štěrbině. Ideální tvar vtoků by teoreticky bylo možné docílit pomocí vhodně zvolenému sledu výrobních technologií.



Obrázek 4-17 Vlevo: zářezy mimo požadovanou oblast způsobené rádiusovou frézou; vpravo: ideální provedení vtoků

Řešením může být cílené vhodné odebrání materiálu v místech, kde by se fréza zařezala mimo požadovanou oblast a následně toto vybrání zaplnit. Možný přístup zobrazuje Obrázek 4-18, na kterém je vlisován váleček do jednoho vtoků a je tak odstraněn nechtěný prostor navíc. Možností eliminace nechtěného prostoru je více, přičemž princip je stále stejný.

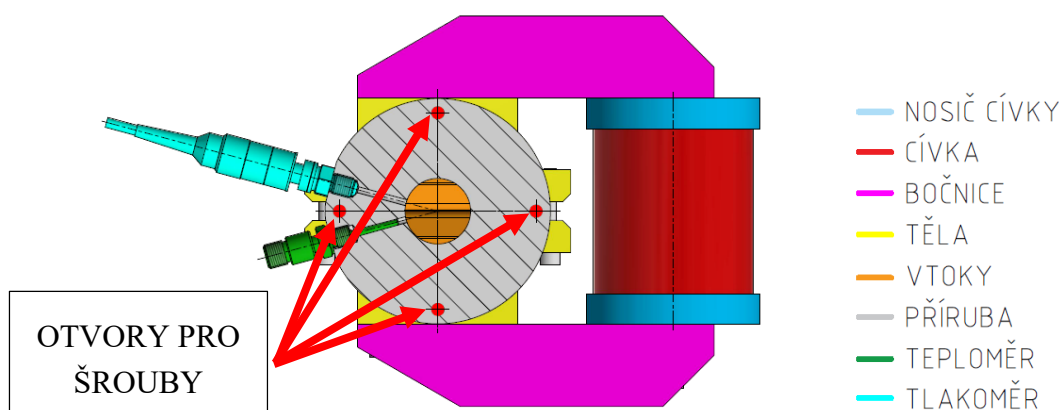


Obrázek 4-18 Vtoky upraveny pomocí nalisovaných válečků

4.2.3 Umístění snímačů a šroubů reometru

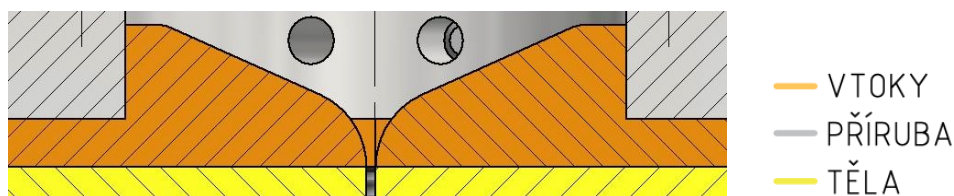
Na vyvíjeném reometru budou použity dva tlakoměry a jeden teploměr, které budou zašroubovány v přírubách. To je stejné provedení, jako na třetí evoluci slit-flow reometru. V jedné přírubě tak bude jak tlakoměr, tak teploměr (viz Obrázek 4-19), ve druhé přírubě bude jenom tlakoměr. Snímače musí být umístěny co nejbliž štěrbiny. U tlakoměrů je navíc důležité, aby na obou stranách štěrbiny měřily tlak ve stejném místě. Rozměry snímačů jsou známe, protože se použijí stejné, jako na třetí evoluci slit-flow reometru. I při změně za tlakoměry s jiným měřicím rozsahem od stejného výrobce zůstávají jejich přípojovací i celkové rozměry stejné.

Možnosti umístění snímačů jsou omezeny dalšími součástmi reometru. Polohu snímačů nejvíce ovlivňuje magnetický obvod. Kvůli cívce a bočnicím není možné snímače umístit do těchto míst. Zbývá tedy poslední možnost umístění – viz Obrázek 4-19. Tento obrázek zároveň zobrazuje v přírubě otvory pro šrouby, které drží reometr pohromadě. Byly uvažovány čtyři šrouby, což je stejný počet, jako u třetí evoluce. Jejich rozmístění je ale pravidelné po 90°.



Obrázek 4-19 Umístění snímačů a znázorněná poloha děr pro šrouby, reometr s magnetickým obvodem

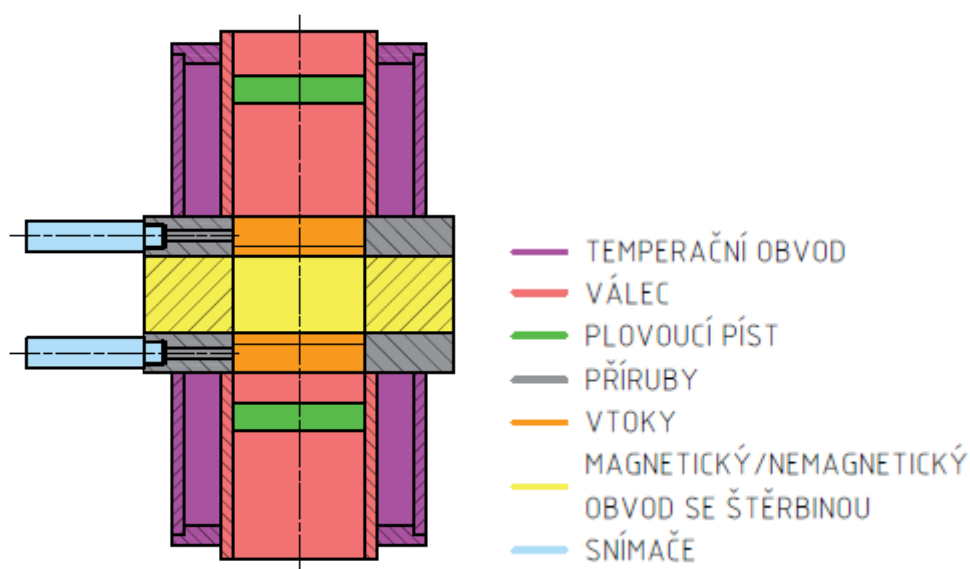
Takto umístěné snímače umožňují vyústění otvorů v blízkosti štěrbiny mezi vtoky – viz Obrázek 4-20. Otvory pro snímače musí být umístěny tak, aby přes ně těsnění na pístu nepřejíždělo, což by mohlo způsobit jeho poškození nebo poškození bronzových vodících kroužků.



Obrázek 4-20 Otvory pro snímače

4.2.4 Válec

Válec reometru je jedna z jeho hlavních částí, která se při výměně vzorku kapaliny vždy demontuje. Jeho uchycení k přírubě musí být proto co nejjednodušší, aby se proces výměny vzorku zbytečně neprodložoval. Návrhy byly provedeny tak, aby bylo možné válec demontovat pouze rukou bez nutnosti nástrojů. Obrázek 4-21 zobrazuje umístění obou válců. Je vidět, že na obou válcích je přítomen také temperační obvod.



Obrázek 4-21 Válec a temperační obvod vyvíjeného slit-flow reometru

U vyvíjeného reometru se kvůli snaze zjednodušit konstrukci a zrychlit proces výměny vzorku uvažoval závit vyrobený přímo na válci. Pro výrobu válce bylo naplánováno použít polotovar z hydraulické trubky, který je pro tento účel vhodný díky geometrické i rozměrové přesnosti na vnitřní válcové ploše. Je cílem ho obrábět co nejméně, aby zbytková pnutí po obrábění nenarušila přesnost této plochy.

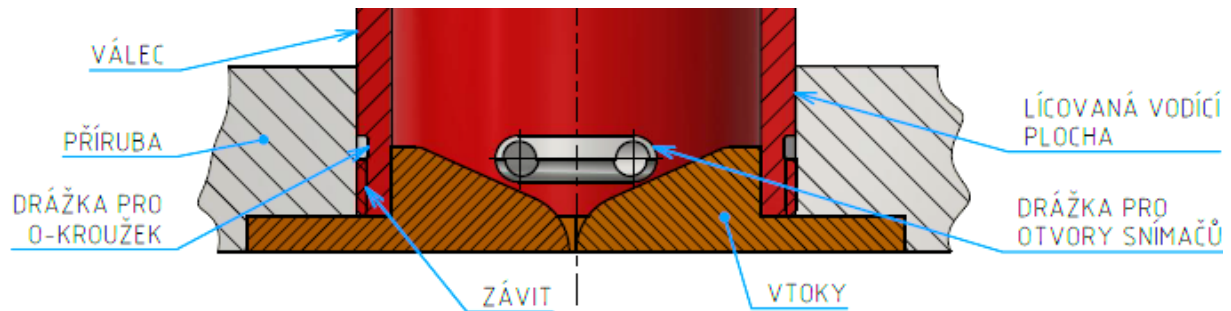
U válce bylo nutné zajistit svislou polohu jeho osy, aby osy válců na obou stranách reometru byly rovnoběžné. Podrobněji byly důvody rozvedeny v kapitole 5.2. Při návrhu uchycení válce je výška příruby hlavní omezující faktor. Kvůli hmotnosti a úspoře materiálu byla snaha udělat přírubu co nejtenčí.

Dalšími omezujícími faktory jsou snímače a jejich otvory – viz Obrázek 4-21. Jedná se přitom jak o teploměr, tak o tlakoměry. Otvory pro snímače musí být vyvedeny co nejbližší štěrbině a nemohou být v kolizi s válcem. Obě navržené varianty přichycení válce mají snímače v přírubě umístěné tak, aby jejich připojovací závit měl nejmenší vliv na výšku příruby.

Jako poslední omezující faktor je temperační okruh. Ten má za úkol držet teplotu kapaliny na požadované hodnotě, proto válec musí být co nejméně exponovaný, aby jeho vnější stěny byly co nejméně v kontaktu s vodou v temperačním okruhu. Díky tomu se zajistí efektivní odvod nebo přívod tepla.

Válec s lícovanou vodící plochou a závitem

Válec v této variantě prochází téměř skrz celou přírubu a dotahuje se až na vtoky – viz Obrázek 4-22. Na jeho vnější válcové ploše je závit a hned za ním je lícovaná vodící plocha pro zajištění svislé polohy osy. Drážka pro o-kroužek v této variantě slouží zároveň jako drážka pro soustružený závit, která je nutná z technologických důvodů. Otvory pro snímače jsou vyvedeny mezi vtoky a aby byly v kontaktu s kapalinou, musí být ve stěně válce vyfrézovaná drážka.



Obrázek 4-22 Válec zaveden co nehlouběji do příruby

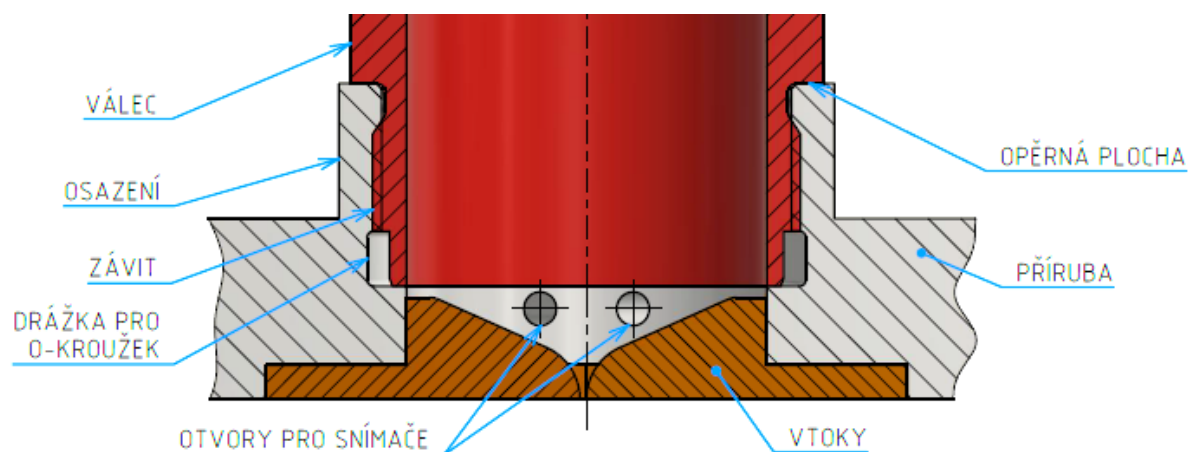
Výhodou této varianty je splnění stanovených kritérií a minimalizace výšky příruby. Zároveň při výrobě příruby bude dobrá využitelnost materiálu. Problémy může způsobovat drážka pro snímače a zajištění její přesné orientace vůči otvorům pro snímače v přírubě.

Teoreticky by bylo možné zajistit orientaci válce vůči přírubě pomocí značek umístěných na těchto součástech. Toto řešení ale poskytuje prostor pro chyby během montáže a také by to neřešilo stav, kdy se například vlivem vibrací válec může povolit.

Aby nemohlo dojít k překrytí otvorů pro snímače, musela by drážka být dostatečně dlouhá, což by oslabilo válec. Dále o-kroužek umístěný až za závitem způsobí, že do závitu vnikne kapalina. V případě MR kapaliny mohou vniknout i feromagnetické částičky, které mohou způsobit obtížnější povolování válce. Především by to ale zajistilo přítomnost malého objemu vzduchu v závitech a v drážce pro o-kroužek, který by se nepovedlo odstranit během odvodu vzduchu reometru a během měření by se projevil pružností. Takhle varianta pravděpodobně zvýší tloušťku obou přírub, protože koncepce závitu, drážky a lícované vodící plochy budou prostorově náročné.

Válec s opěrnou plochou a závitem

Tato varianta vznikla s respektováním polohy otvorů pro snímače – viz Obrázek 4-23. Tloušťka příruby se navrhla s ohledem na připojovací rozměry snímačů co nejnižší. Válec je oproti předchozí variantě umístěn tak, aby do otvorů pro snímače nezasahoval. Kvůli tomu musí být na přírubě osazení, které zajišťuje dostatečnou plochu pro závit, pro těsnění a zároveň zajišťuje svislost osy válce. Svislá osa válce se zajistí pomocí opěrné plochy na přírubě, na kterou se válec dotáhne.



Obrázek 4-23 Válec uchycen za osazení na přírubě

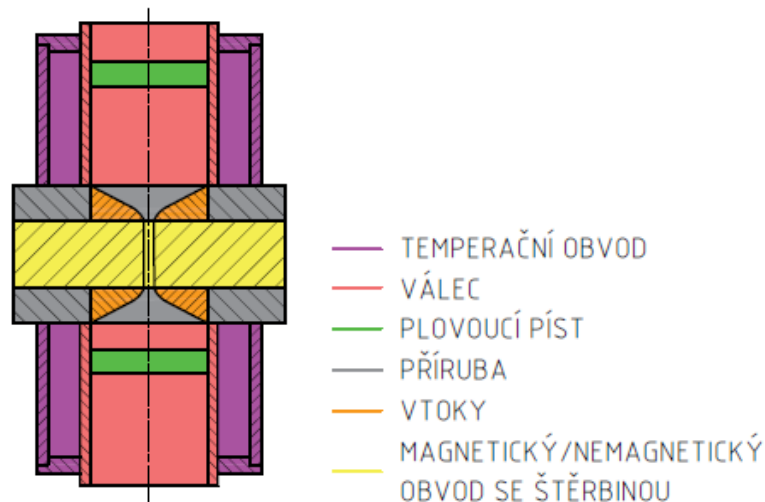
Pro zachování funkčnosti tohoto návrhu musí být mezi válcem a přírubou malá vůle v místě těsně nad otvory pro snímače. Válec v těchto místech nesmí dosednout, dosednout musí na opěrné ploše. Dále je důležité zajistit, aby plovoucí píst nepřejížděl přes hranu mezi válcem a přírubou. To by totiž mohlo způsobit poškození jeho těsnění.

Aby nedocházelo k úniku zkoumané kapaliny, musí být prostor utěsněn. Pro utěsnění opět slouží o-kroužek, který byl tentokrát umístěn před závitem. Díky tomu nedojde k problému popsanému u předchozí varianty. Aby se o-kroužek nepoškodil o začínající závit, je vhodné použít ještě opěrný kroužek.

Kvůli osazení se závitem na přírubě se k její výrobě musí použít delší polotovary a využitelnost materiálu nebude tak dobrá, jako u předchozí varianty. Více materiálu ale přidává možnosti pro uchycení válce temperačního obvodu.

4.2.5 Temperační obvod

Úlohou temperačního obvodu je zajistit teplotu zkoumané kapaliny v požadovaném intervalu. Během protlačení kapaliny štěrbinou se totiž kapalina vlivem hydraulických ztrát zahřívá. V závislosti na velikosti viskozitního indexu se s teplotou mění i její viskozita (čím je viskozitní index vyšší, tím je viskozita méně závislá na teplotě). Teplota kapaliny tedy přímo ovlivňuje naměřené výsledky. Temperační obvod bude umístěn na obou válcích tak, jak znázorňuje Obrázek 4-24.



Obrázek 4-24 Temperační obvod na reometru

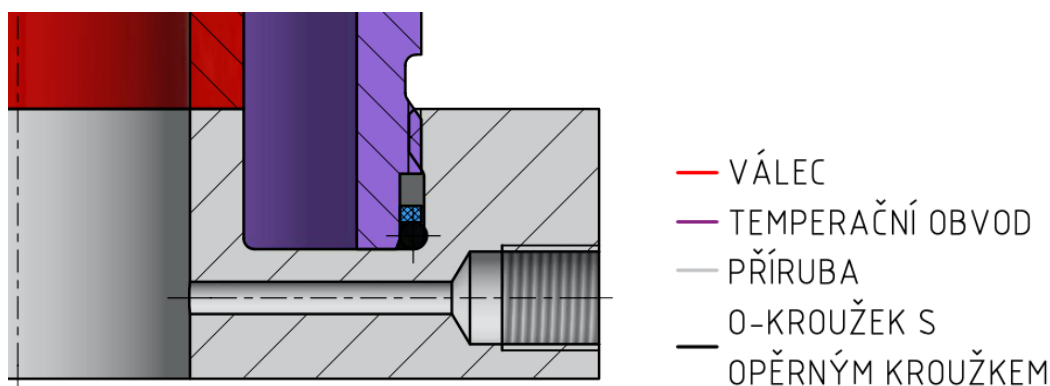
Temperační obvod v podstatě tvoří trubka, kterou protéká voda. Voda je do něj přivedena hadicí, která bude s reometrem spojena pomocí rychlospojek. Temperační obvod musí být umístěn tak, aby voda byla v kontaktu s co největší plochou stěny válce, který byl navržen tak, aby byl co nejvíc exponovaný. Umístění i tvar jsou tedy dané a jediné, co se řešilo, bylo spojení temperačního obvodu s přírubou reometru.

Temperační obvod se bude demontovat při každé výměně kapaliny, proto musí být spojen se zbytkem reometru tak, aby to bylo možné provést jednoduše a rychle. Nejjednodušší spojení je, stejně jako u válce reometru, pomocí závitů na ploše trubky, který se našroubuje do příruby. Nejsou tak potřeba žádné další spojovací součásti. Na povrchu válce navíc může být vroubkování, které zjednoduší ruční montáž nebo demontáž. Uvažovaly se dva možné přístupy, každý z nich jinak ovlivňuje výšku příruby.

Na obrázcích obou variant je válec znázorněn zjednodušeně bez spojovací části s přírubou, aby nebyl matoucí vzhledem k různým variantám jeho uchycení. Obě varianty mají také stejný princip utěsnění pomocí o-kroužku. Toto řešení je totiž nejjednodušší. O-kroužek může být ve spodní části temperačního obvodu doplněn ještě o opěrný kroužek, aby nemohlo dojít k jeho poškození o začínající závit. K utěsnění mezi válcem a temperačním obvodem je u obou variant zamýšleno použití o-kroužku, což je stejné řešení, jako na předchozí evoluci slit-flow reometru.

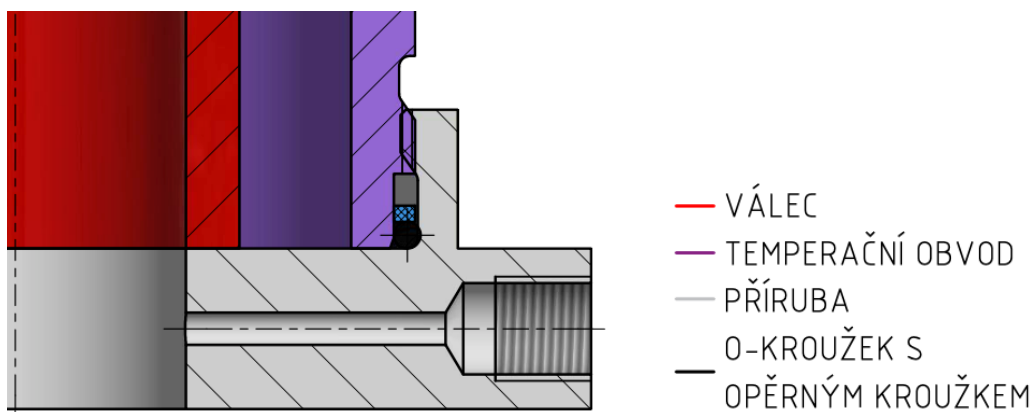
Obrázek 4-25 znázorňuje první variantu. Válec temperačního obvodu se zašroubuje do závitů v přírubě. U této varianty limituje hloubku zašroubování jenom díra nutná pro snímač tlaku a teploty. Kvůli tomu musí být příruba relativně tlustá, aby bylo možné do ní vysoustružit závit včetně jeho drážky. Tato varianta nevyžaduje velké úběry materiálu, na druhou stranu ale kvůli její větší tloušťce naroste hmotnost reometru.

V této variantě musí být připojovací prvky hadic umístěné na temperačním válci dále od příruby, takže zde vznikne větší prostor, ze kterého se bude obtížně vylévat zbývající voda.



Obrázek 4-25 Varianta s tlustou přírubou

Obrázek 4-26 znázorňuje druhou variantu. U této varianty nemusí být příruba příliš vysoká, protože potřebná část se závitem je na osazení. Jediným prvkem, který udává výšku příruby, je tak závit pro snímače. Díky její menší tloušťce bude reometr lehčí, za to ale využitelnost materiálu nebude tak dobrá kvůli velkým úběrům, které také prodlouží výrobu.



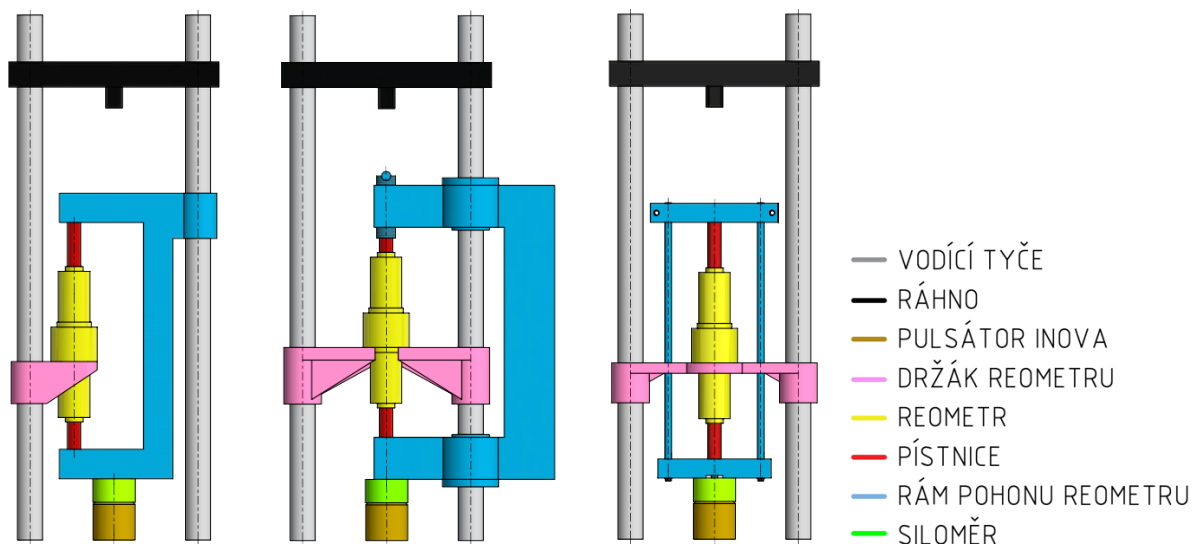
Obrázek 4-26 Varianta s tenkou přírubou

4.3 Držák reometru a rám pohonu

Rám pohonu reometru zajišťuje přenos síly z lineárního aktuátoru na plovoucí písty a držák zajišťuje reometr v požadované poloze – viz Obrázek 4-27. V návrzích byl kladen důraz na to, aby poskytly dostatečný prostor pro manipulaci s reometrem.

Na třetí evoluci slit-flow reometru splňoval jeho pohon funkční požadavky zejména s ohledem na přizpůsobitelnost různým objemům kapaliny a na nastavitelnost vůle pro tepelnou dilataci kapaliny. Toto řešení ale neposkytovalo dobrou uživatelskou přívětivost, prodloužovalo dobu nutnou k výměně vzorku a vlivem montážních a výrobních nepřesností nebylo zajištěno působení síly na plovoucí písty přesně v ose reometru. Nový pohon by proto měl tyto problémy vyřešit.

Jako hnací jednotka se bude nadále využívat hydraulický pulsátor Inova. Nový pohon reometru byl proto navrhován na stávající konstrukci, kterou je pulsátor vybaven – viz Obrázek 4-27. Jedná se o ráhno a vodící tyče, mezi kterými je uprostřed umístěn samotný pulsátor Inova. Tyto rozměry byly tedy dané a byly limitem při návrhu. Zároveň byl při návrhu uvažován plán do budoucna, jehož cílem je vytvořit z reometru standalone zařízení. Držák reometru včetně rámu pohonu by se měly bez změn dat použít v jiné konstrukci se samostatným pohonem.



Obrázek 4-27 Prostorové uspořádání pohonu reometru; vlevo: reometr uchycen na jedné vodící tyči, uprostřed: reometr v ose lin. aktuátoru s pohovem ve tvaru C, vpravo: reometr v ose aktuátoru s tyčovým pohonem

Reometr drží v požadované poloze jeho držák. Je možné uvažovat dva způsoby provedení – viz Obrázek 4-27. Buď se reometr uchytí v ose lineárního aktuátoru a jeho držák tak bude připevněn na obou vodících tyčích, nebo se reometr vychýlí směrem k jedné z vodících tyčí, na kterou se jeho držák připevní.

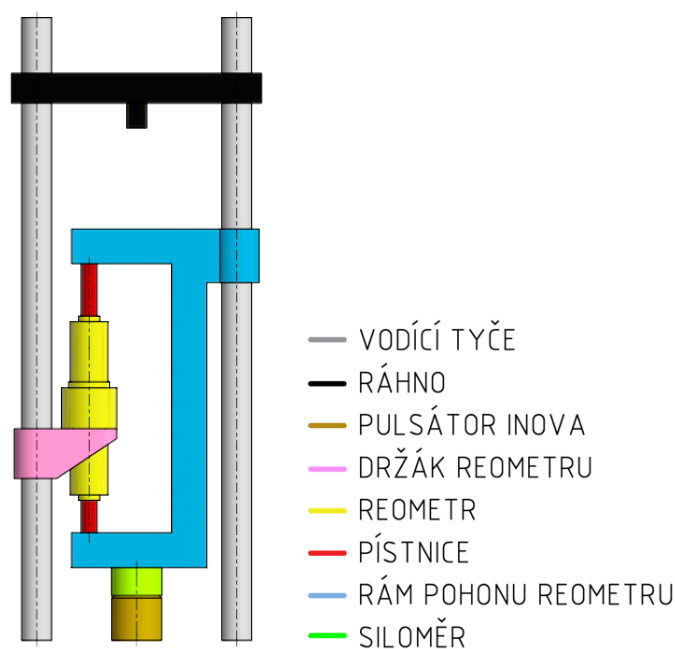
Rám pohonu reometru zajišťuje přenos síly z lineárního aktuátoru na plovoucí písty reometru. Díky tomu dochází k protlačení kapaliny šterbinou. Musí umožňovat snadné nastavení vůle mezi ním a pístnicí. Díky této vůli bude umožněna tepelná dilatace kapaliny, která se v reometru vlivem velkých hydraulických odporů šterbiny zahřívá. Zabrání se tak nárůstu tlaku v reometru. Dále se musí snadno přizpůsobit různým použitým délkám šterbiny a stejně tak různým objemům kapaliny v reometru.

Při návrhu všech variant bylo nezbytné uvažovat umístění siloměru, který chrání celou konstrukci proti přetížení. Do programu, který vyhodnocuje měření, vstupuje tlakový spád, ze kterého se dopočítá velikost síly. Tato síla ale nejde použít pro ochranu konstrukce proti přetížení a je proto nutné přidat k zařízení siloměr. Vlivem nepříznivých okolností se totiž může stát, že plovoucí píst dosedne na dosedací plochu na vřecích a lineární aktuátor bude nadále tlačit. Tlakový spád v tomto případě bude nulový, ale síla tlačícího pulsátoru nulová nebude. Tento stav by mohl vést k přetížení a následnému zničení zařízení, kterému přidání siloměru zabránilo. U všech variant bylo nejvhodnější umístit siloměr do spodní části konstrukce mezi lineární aktuátor a rám pohonu reometru.

V dalších podkapitolách jsou pro lepší přehlednost rozděleny koncepční varianty obou konstrukčních uzlů. U jednotlivých koncepcí držáku reometru byly zároveň rozebrány různé přístupy k jeho upevnění na vodící tyči. Toto upevnění musí být realizovatelné tak, aby se držák nemusel na vodící tyč nasouvat shora. Jeho nasouvání shora by bylo velmi nepohodlné a zdlouhavé a navíc by se muselo pokaždé demontovat horní ráhno, které slouží jako výztuha vodících tyčí. Spojení navrhovaného držáku reometru s vodící tyčí bude provedeno pomocí děleného svěrného spoje.

4.3.1 Držák reometru

Je patrné, že rám pohonu reometru a jeho držák vzájemně ovlivňují svou geometrii. Koncepční návrhy držáku byly zpracovány pouze pro variantu uchycení na jedné vodící tyči – viz Obrázek 4-28. V porovnání s držákem uchyceným na dvou vodících tyčích je totiž menší, lehčí, levněji vyrobitelný a jeho montáž nebo demontáž je výrazně jednodušší. Především díky malým rozměrům je vhodnější pro budoucí záměr vytvořit z reometru standalone konstrukci.



Obrázek 4-28 Držák reometru uchycen na jedné vodící tyči

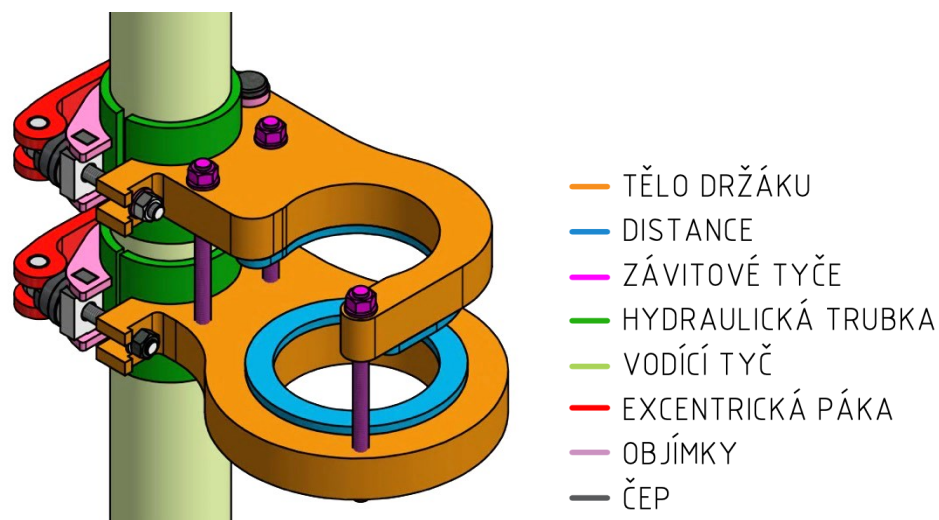
Možným problémem u takového řešení je jeho tuhost. Průhyb u takto provedeného držáku bude největší na jeho konci, resp. na nejvzdálenějším bodě od osy vodící tyče. Stejně tak zde bude největší úhlové natočení. Tento problém je možné vyřešit vhodně navrženou geometrií držáku, která poskytne dostatečnou tuhost.

Dalším možným problémem je tuhost celé konstrukce s vodícími tyčemi na hydraulickém pulsátoru Inova a také to, že se tato konstrukce může dostat do rezonance. V laboratoři je ale k tyčím možné připevnit vzpěry a tím ovlivnit toto chování.

Držák se musí snadno přizpůsobit různým výškám reometru, které se budou měnit v závislosti na délce použité štěrbině a reometr v něm musí být uložen bez vůlí. Stejně tak musí být zabráněno jakýmkoliv pohybům reometru v držáku, např. jeho rotaci. Tato problematika by se řešila bez ohledu na zvolenou koncepční variantu, proto byla rozebrána až v kapitole 5.4.1 věnující se finálnímu konstrukčnímu řešení.

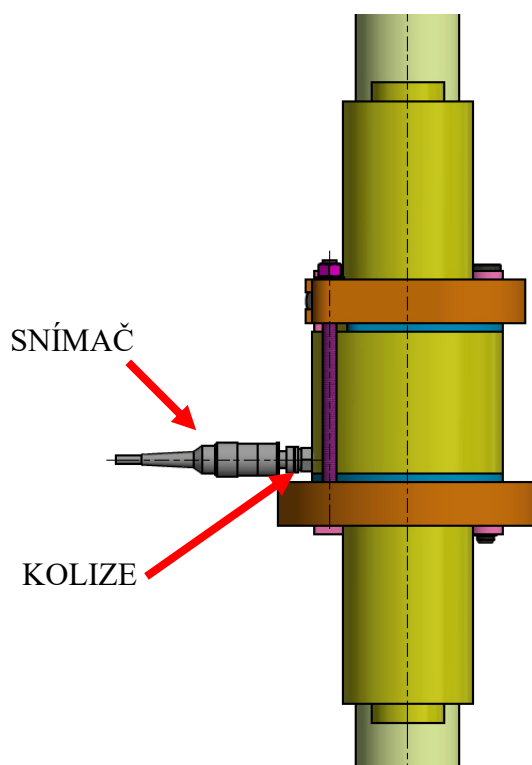
Varianta 1

Tato varianta vznikla především s ohledem na levnou výrobu. Držák reometru je rozdělen na dvě poloviny, přičemž základní prvek každé poloviny tvoří tělo držáku vyrobené technologií vypalování z plechu – viz Obrázek 4-29. Tato výrobní technologie je relativně levná, dosahuje dobré přesnosti a maximální tloušťka ocelového materiálu k vypalování je u nejvýkonnějších strojů 25 mm.



Obrázek 4-29 Držák reometru varianta 1

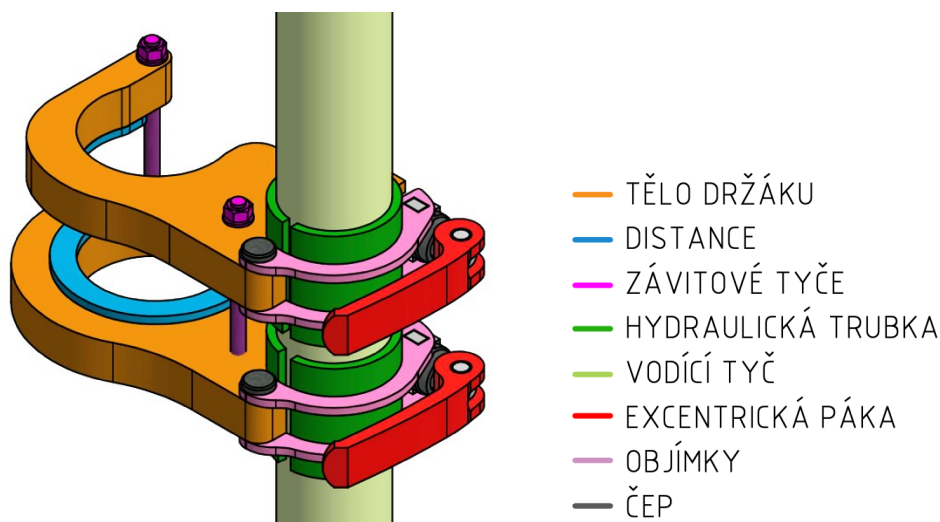
Mezi zbývající prvky patří distance, na které dosednou příruby reometru, a tím zabrání kolizi snímačů s tělem držáku – viz Obrázek 4-30. Prvky pro řešení svěrného spoje držáku s vodící tyčí byly rozebrány podrobněji dále v této kapitole.



Obrázek 4-30 Kolize snímače

Obě poloviny držáku je možné ještě spojit pomocí závitových tyčí, což pomůže zvýšit jeho tuhost a únosnost. Zvýšení únosnosti se projeví díky tomu, že pro přenášení zatížení od lineárního aktuátoru budou díky spojení využity svěrné spoje na obou polovinách držáku. Bez tohoto spojení by zatížení od lineárního aktuátoru přenášelo vždy jenom jedno svěrné spojení v závislosti na směru protlačení. Tuhost se zvýší díky tomu, že se zatížení od lineárního aktuátoru rozdělí na obě těla držáku. Zároveň ale spojení závitovými tyčemi prodlouží dobu nutnou k montáži nebo demontáži reometru.

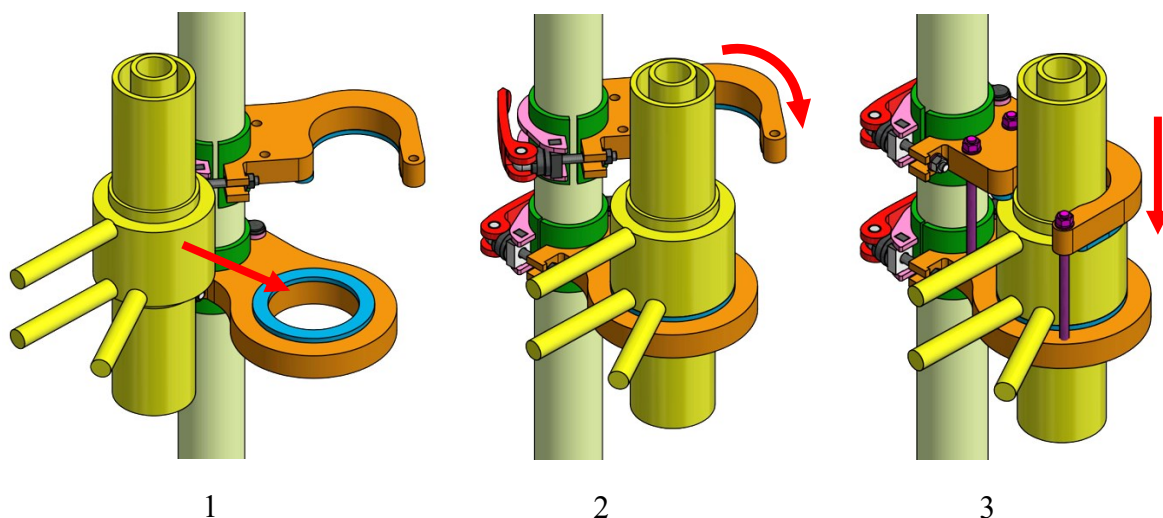
Obrázek 4-31 poskytuje pohled na jeden z přístupů k upevnění držáku reometru na vodící tyč. Jeho základem je dělená hydraulická trubka, která se pohybuje na pantu tvořeném čepem. Pomocí excentrické páky se vyvodí potřebná upínací síla. Objímky pro spojení excentrické páky s pantem by bylo možné také zhotovit technologií vypalování z plechu.



Obrázek 4-31 Držák reometru varianta 1 - pohled na svěrný spoj

Hydraulická trubka byla uvažována z toho důvodu, že bude mít dostatečnou rozměrovou přesnost pro svěrný spoj. Excentrické páky je možné koupit v mnoha provedeních a dokáží vyvodit maximální osovou sílu až 8 kN. Tyto páky tedy poskytují relativně velkou upínací sílu v kombinaci s velmi rychlou montáží a demontáží držáku. Při hlubším rozboru tohoto návrhu by bylo navíc možné v případě potřeby konstrukci upravit na použití více upínacích pák pro vyvození potřebné upínací síly.

Upínání reometru do držáku by proběhlo v několika krocích – viz Obrázek 4-32. Nejprve se vloží do spodní poloviny držáku, která má v sobě díru. Mezi vnitřní dírou v distanci a osazením na přírubě reometru je minimální vůle a díky tomu je reometr přesně usazen. Horní polovina držáku je při tomto úkonu odkloněná. Jakmile je reometr vložen ve spodní polovině, přikloní se horní polovina a jejím dotlačením se vymezí vůle (např. pomocí zmiňovaných závitových tyčí). Následně se svěrné spojení na horní polovině dotáhne, čímž se zajistí její poloha. Excentrické páky se pro toto provedení držáku tedy velmi hodí, protože zrychlí manipulaci zejména s horní polovinou držáku.



Obrázek 4-32 Postup vkládání; 1 – vložení reometru do spodní poloviny držáku, 2 – přiklonění horní poloviny, 3 – dotlačení a fixace horní poloviny držáku

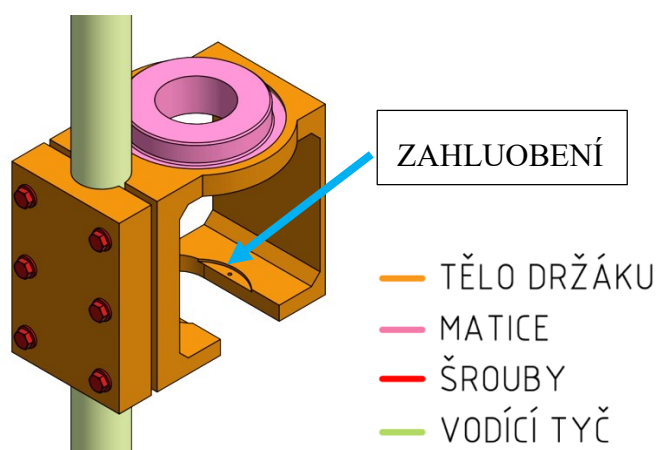
Použitím závitových tyčí se zlepší parametry držáku. Závitové tyče blízko svěrného spojení s vodící tyčí zvyšují únosnost, protože zatížení pobírají svěrná spojení na obou polovinách držáku. Závitová tyč na druhé straně držáku zvyšuje tuhost celku. Zároveň ale komplikují následné vyjímání reometru z držáku, protože se budou muset demontovat.

Tato varianta poskytuje možnost relativně levné výroby. Hlavní částí držáku jsou dva výpalky, na které se přivaří trubky tvořící svěrné spojení s vodícími tyčemi. V důsledku svařování se ale nepodaří zachovat rovnoběžnost obou polovin držáku. To by mělo vliv na polohu reometru, jehož osa by mohla být vychýlená vůči svislému směru. Pro zajištění požadované přesnosti by bylo proto nutné po svaření ještě obě poloviny držáku zarovnat na frézce.

Varianta 2

Tělo držáku je u této varianty vyrobeno z jednoho kusu materiálu a jeho součástí je i svěrný spoj s vodící tyčí – viz Obrázek 4-33. Nezbytné velké úběry materiálu ve vnitřní oblasti držáku je možné vyřešit pomocí technologie elektroerozivního obrábění, kdy se vnitřní geometrie vyřeže a zbylý materiál bude dále využitelný jako polotovary pro výrobu jiných součástí. Nebude to tedy odpad alepší se využitelnost materiálu.

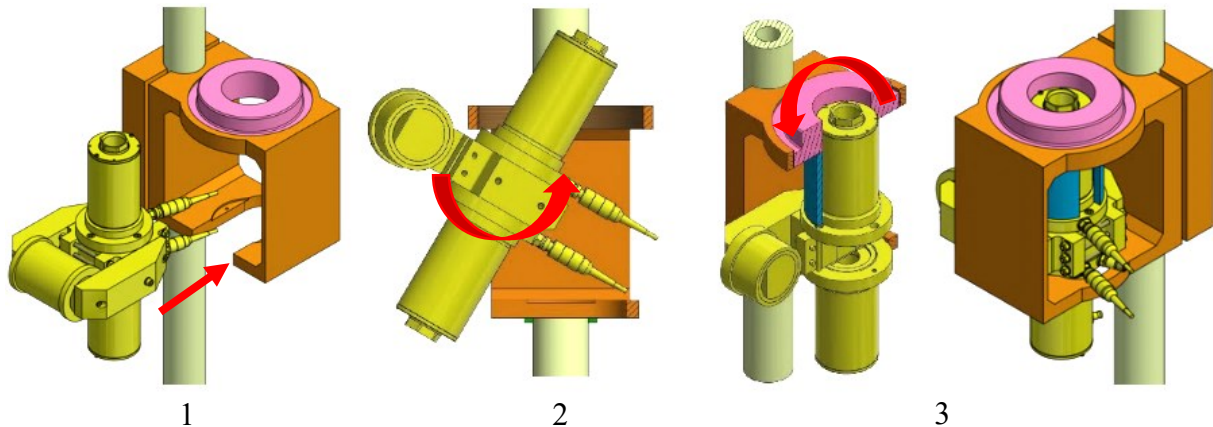
Ve spodní části těla držáku je patrná drážka, která je nutná pro zamýšlený princip vkládání reometru (viz dále v této kapitole). Zároveň je v této oblasti patrné zahloubení. Toto zahloubení je určeno pro přírubu reometru, která v něm bude uložena a díky tomu bude reometr v držáku přesně usazen.



Obrázek 4-33 Druhá varianta uchycení reometru na jedné tyči

V horní části držáku je umístěna matice, pomocí které se reometr upevní a odstraní se vůle. Je vidět (viz Obrázek 4-33), že otvor se závitem pro matici je relativně velký. To je způsobeno zamýšleným principem vkládání reometru do držáku.

Vkládání reometru do držáku znázorňuje Obrázek 4-34. Jako první krok je nutné reometr vsunout do díry se závitem pro matici a až poté jej usadit do zahloubení ve spodní části těla držáku. Při tomto úkonu by v držáku neměla být matice. Jakmile je reometr uložen v zahloubení, přichází na řadu poslední krok – jeho zajištění. K tomu je potřeba využít distanční trubku (Obrázek 4-34 – modrá součást), která se nasune na válec temperačního obvodu reometru. Dotažením matice se reometr v držáku upevní.



Obrázek 4-34 Postup vkládání reometru; 1 – reometr se orientuje snímači dopředu, 2 – nahnutí a provlečení reometru dírou se závitem, 3 – ustavený reometr se dotáhne pomocí matice (růžová) a distanční trubky (modrá)

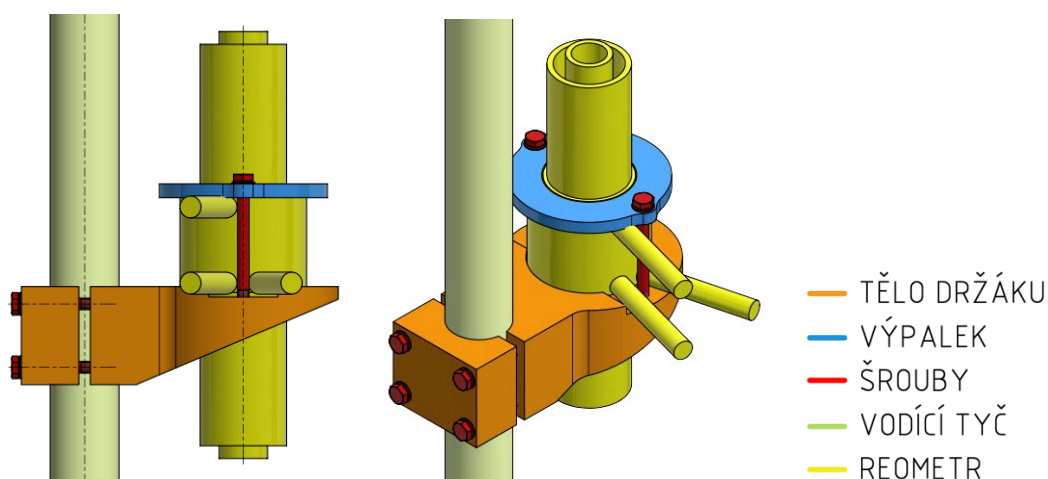
Distanční trubka musí mít na jedné straně drážku, aby byl umožněn přívod a odvod vody z temperačního obvodu reometru. Změnou její délky bude možné držák přizpůsobovat různým délkám štěrbin v reometru.

V porovnání s předchozí variantou zde bylo využito menší množství součástí. Velká výhoda spočívá v provedení svěrného spoje, které je velmi jednoduché a při vkládání nebo vyjímání reometru tyto úkony nijak neovlivňuje. Tělo držáku by bylo relativně velké a tedy i těžké, ale dokáže spolehlivě zajistit polohu reometru, jeho rychlou montáž nebo demontáž a poskytuje dobrou uživatelskou přívětivost. Pro práci s maticí by bylo nutné používat nástroj.

Varianta 3

Myšlenka výroby těla držáku z jednoho kusu materiálu byla použita i v této koncepční variantě – viz Obrázek 4-35. Díky tomu je možné provést svěrný spoj stejným způsobem, jako v předchozí variantě a minimalizovat tak množství součástí. Geometrie těla držáku zajišťuje jednoduchou výrobu s dobrou využitelností materiálu.

Spolu s tělem držáku je zde použit i výpalek, který slouží k zajištění reometru. Tento výpalek je pomocí dvou šroubů upevněn k tělu držáku a jejich dotažením je reometr zajištěn. Různou délkou těchto šroubů je možné jednoduše držák přizpůsobit různým délkám štěrbin v reometru. Celkem jsou v tomto návrhu použity dvě součásti spolu se šrouby, jedná se tedy o nejjednodušší variantu.



Obrázek 4-35 Třetí varianta uchycení reometru na jedné vodící tyči

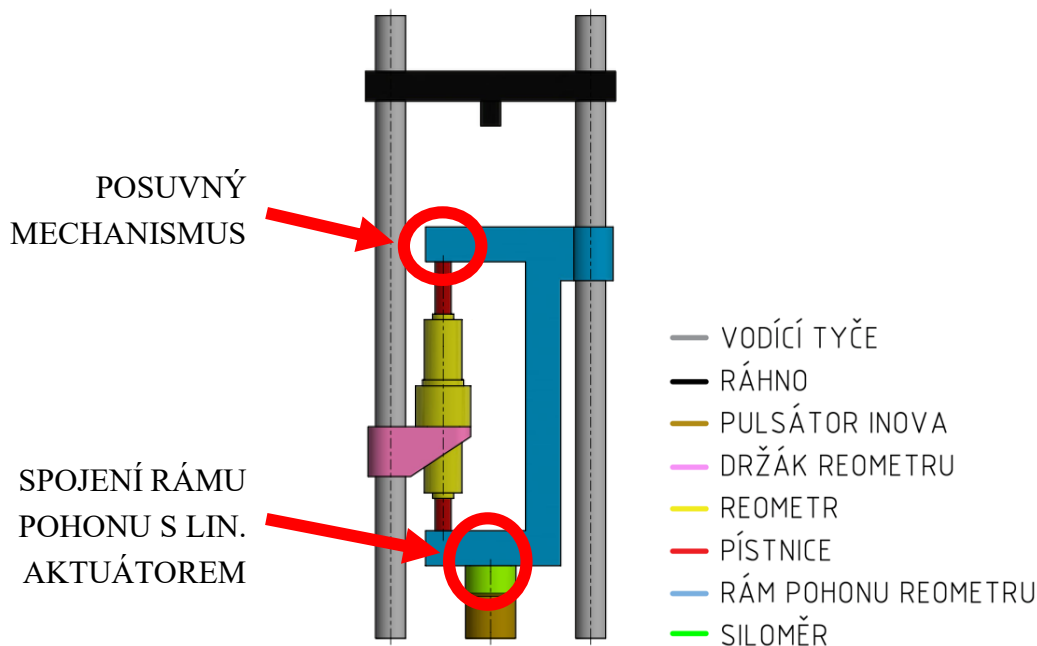
Proces vkládání reometru je možné dobře popsat i bez schématického obrázku. Do těla držáku se reometr jednoduše shora vloží. Následně se na reometr nasadí výpalek a dotáhne se šrouby. Celý tento proces je tedy velmi jednoduchý a rychlý.

Ze všech představených variant tahle varianta obsahuje nejméně součástí a je proto nejjednodušší. Díky dobrému geometrickému řešení poskytuje prostor pro manipulaci s reometrem během vkládání nebo vyjímání. Zároveň splňuje všechna kritéria na uživatelskou přívětivost, funkčnost a rychlost montáže nebo demontáže reometru. Možnou komplikací je přívod a odvod vody z temperačního okruhu, protože spojovací prvky s hadicí budou ovlivňovat geometrii těla držáku.

4.3.2 Rám pohonu reometru

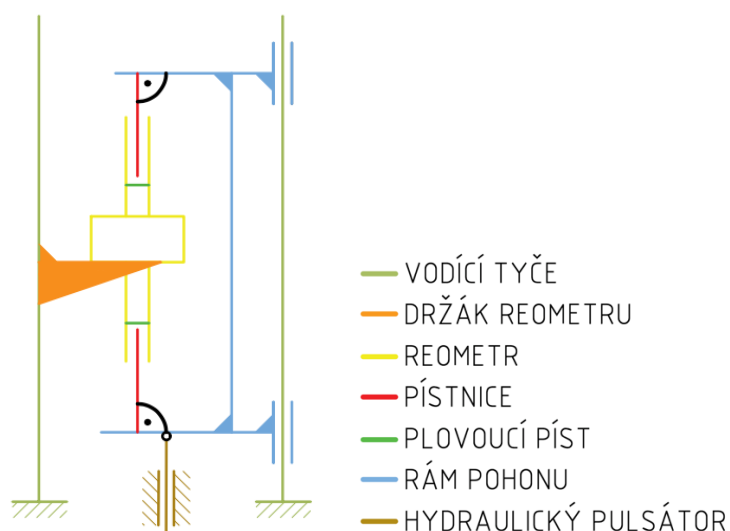
Jak již bylo zmíněno, rám pohonu reometru slouží k přenosu síly z lineárního aktuátoru na plovoucí písty reometru a díky tomu dochází k protlačení kapaliny. Stejně jako u druhé a třetí evoluce slit-flow reometru je nadále zajištěno to, že v obou směrech protlačení jsou plovoucí písty vždy pouze tlačeny. V reometru je proto pokaždé přetlak a nemůže vzniknout podtlak, který by v případě netěsností mohl způsobit, že se dovnitř dostane vzduch.

Díky tomu, že se držák reometru řešil pouze v provedení pro uchycení na jednu vodící tyč, je geometrie rámu pohonu prakticky daná – viz Obrázek 4-36. V kombinaci s tímto držákem je nejvýhodnější provedení rámu pohonu ve tvaru písmene C, proto bude dále rozpracováno s ohledem na funkční požadavky.



Obrázek 4-36 Rám pohonu reometru

Na základě rozboru v kapitole 4.4 se pracovalo už rovnou s variantou dutých pístnic, které jsou vedeny stěnami válců reometru – viz Obrázek 4-37. Tato koncepce se totiž projevila jako nejlepší. Pístnice se budou o rám pohonu pouze opírat svými čelními plochami bez pevného spojení mezi těmito součástmi. Díky tomu, že zde nebude pevná vazba, odpadne vliv výrobních a montážních nepřesností a zjednoduší se proces vkládání reometru.



Obrázek 4-37 Kinematické schéma pohonu reometru

V horní části rámu pohonu reometru bude umístěn posuvný mechanismus zajišťující nastavení vůle, díky čemuž bude umožněna tepelná dilatace kapaliny a také se díky tomu konstrukce přizpůsobí různým objemům kapaliny v reometru. Jeho umístění se neuvvažovalo ve spodní části rámu pohonu, protože zde už bylo nutné řešit jeho spojení s lineárním aktuátorem a navíc nahoře poskytuje lepší ergonomii.

Funkční požadavky na rám pohonu reometru jsou:

- umožnit měření polohy plovoucího pístu
- umožnit tepelnou dilataci kapaliny v reometru
- přizpůsobit se různým délkám štěrby (změna výšky reometru)
- přizpůsobit se různým objemům kapaliny v reometru
- dostatečná tuhost
- zajistit působení síly na reometr v jeho ose

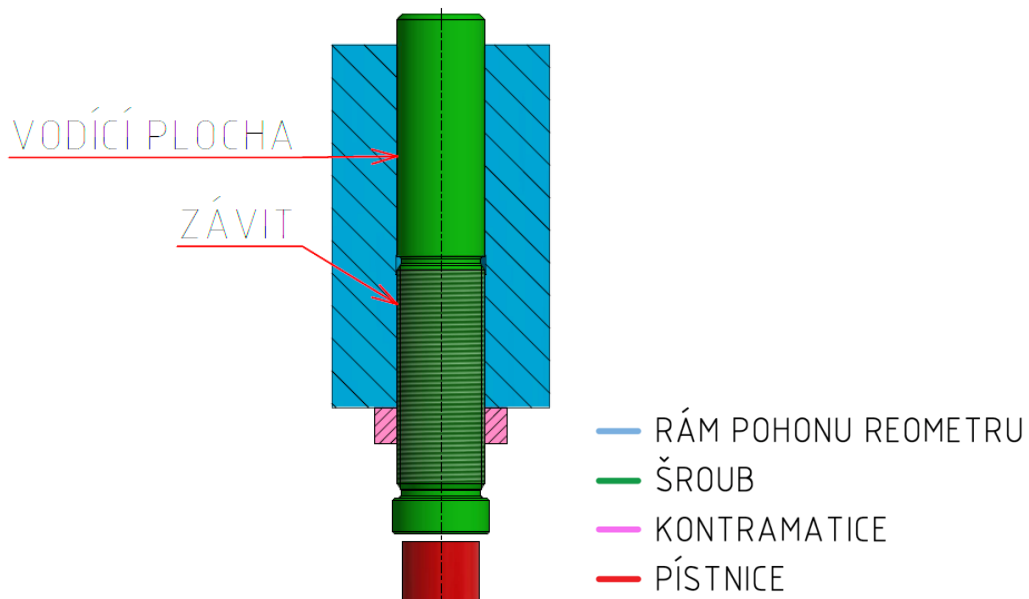
Rám pohonu reometru bude tvořen třemi svařenými jákly. Vzhledem k jeho geometrii je to nejvhodnější řešení, které poskytne rychlou a relativně levnou výrobu. Docílení potřebné přesnosti pro dosedací plochy pístnic by bylo nutné řešit bez ohledu na zvolenou variantu, proto bylo řešeno až v konstrukční části této práce v kapitole 5.4.2. Pro vedení rámu pohonu poslouží lineární ložisko upevněné na jedné vodící tyči.

Dále v téhle kapitole byla rozebrána horní a spodní část rámu pohonu. V horní části byl umístěn posuvný mechanismus, který slouží k přizpůsobení různým objemům kapaliny v reometru a také umožní nastavení vůle mezi ním a pístnicí. Ve spodní části rámu pohonu bylo řešeno jeho spojení s lineárním aktuátorem.

Posuvný mechanismus

Posuvný mechanismus musí mít dostatečný rozsah pohybu, aby se dokázal přizpůsobit různým objemům kapaliny v reometru. Interval použitelných objemů byl zvolen od 30 do 100 ml. Různé objemy totiž ovlivní výšku, ve které se bude pístnice dané délky nacházet. Byly navrženy dvě koncepční varianty.

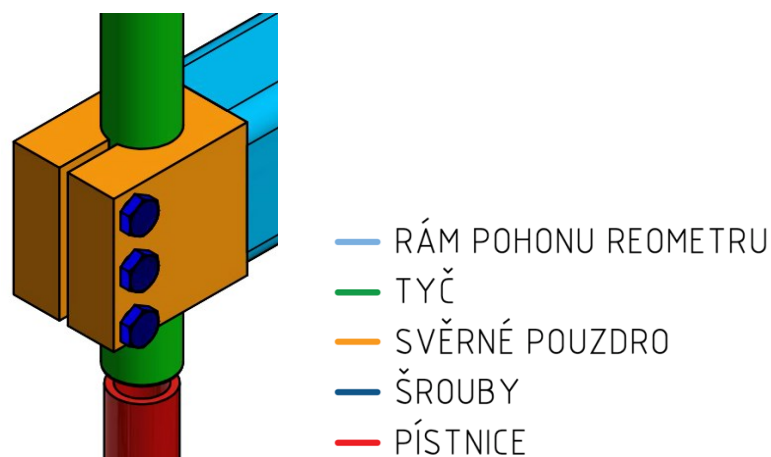
První koncepční varianta spočívá ve využití šroubu pro posuvný pohyb – viz Obrázek 4-38. Tento šroub je zároveň veden vodící válcovou plochou, aby jeho osa byla svíslá. V mechanismu je nutná ještě kontramatice, která šroub zajistí a zabrání jeho případnému povolování. Matici je možné navrhnout tak, aby ji bylo možné utahovat pouze ručně, celý mechanismus by bylo tedy možné obsluhovat bez nutnosti nástrojů.



Obrázek 4-38 Posuvný mechanismus se šroubem

Toto řešení poskytuje spolehlivé zajištění nastavené polohy a zároveň umožňuje dostatečný rozsah pohybu pro přizpůsobení různým objemům kapaliny. Nevýhodou je především dlouhá doba nastavování polohy, která závisí na stoupání závitu. Toto řešení navíc bude mít relativně velké rozměry, které způsobuje umístění vodící plochy za závitem.

Druhá varianta je založena na využití svěrného pouzdra, ve kterém je vložena tyč – viz Obrázek 4-39. Posunem tyče se jednoduše a rychle nastaví požadovaná poloha a následně se šrouby ve svěrném pouzdře zajistí. Svěrné pouzdro je přivařeno přímo na rám pohonu reometru.



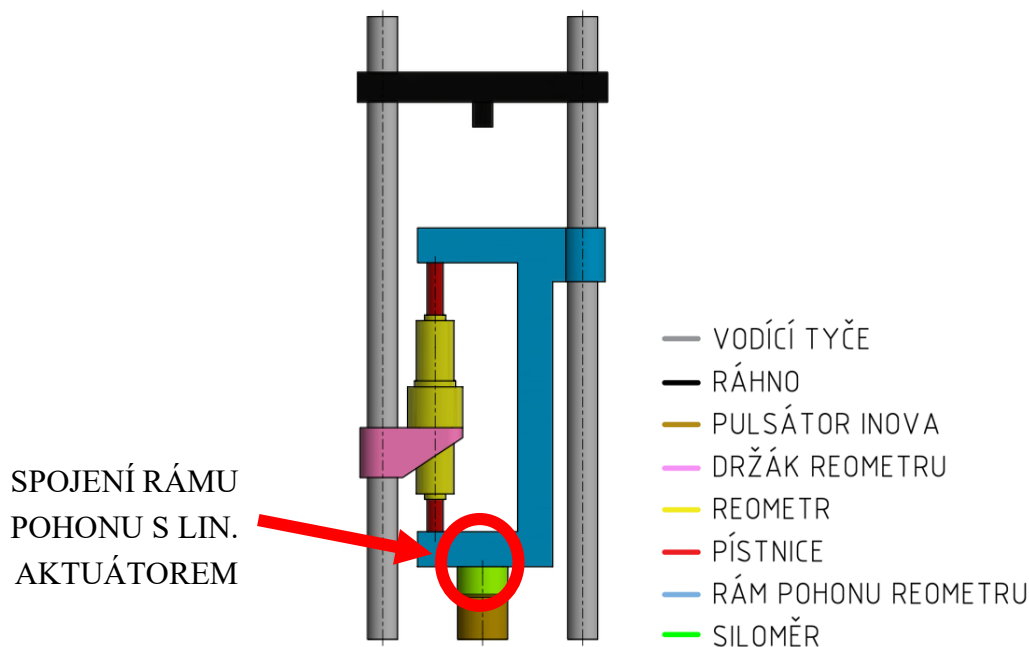
Obrázek 4-39 Posuvný mechanismus se svěrným spojením

Výhodou tohoto řešení je především rychlé nastavení požadované polohy a také jednoduchá výroba s minimálním množstvím dílů. Pro výrobu tyče je možné použít jako polotovary tyč taženou za studena, čímž se ušetří výrobní operace při současném zajištění potřebné přesnosti. Tyč bude potřeba jenom zkrátit na požadovanou délku.

Nevýhodou je fakt, že během protlačení kapaliny mohou vznikat rázy po vymezení vůle s pístnicí. Jejich velikost závisí na typu použitého řídicího signálu lineárního aktuátoru, použité kapaliny, tloušťce štěrbin apod. Tyto rázy mohou způsobit, že se tyč ve svěrném spoji posune a kvůli tomu nebude pevně zajištěna její poloha. Svěrné pouzdro by proto mělo být předimenzováno, aby k posunu tyče nemohlo dojít.

Spojení rámu pohonu s lineárním aktuátorem

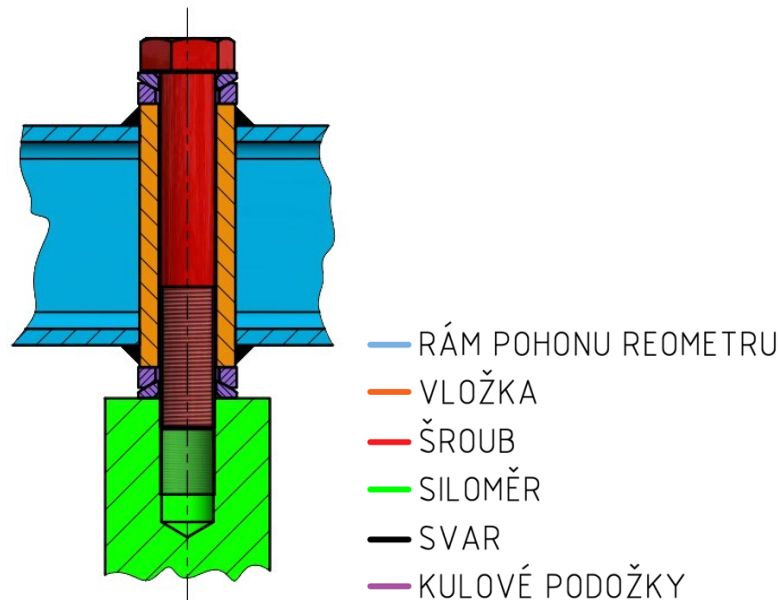
Jak již bylo zmíněno, rám pohonu reometru bude spojen s lineárním aktuátorem přes siloměr. Tento siloměr se už používal a je k dispozici ve školní laboratoři. Jedná se o typ U2AD1/2T od firmy HBM. Pístnice hydraulického pulsátoru Inova má v sobě jiný připojovací závit, než jaký je na siloměru. Mezi těmito součástmi proto bude ještě nutná redukce, která je pro svou jednoduchost řešena v části konstrukčního řešení v kapitole 5.5.2. V téhle části práci se proto řešilo spojení rámu pohonu se siloměrem – viz Obrázek 4-40.



Obrázek 4-40 Rám pohonu reometru

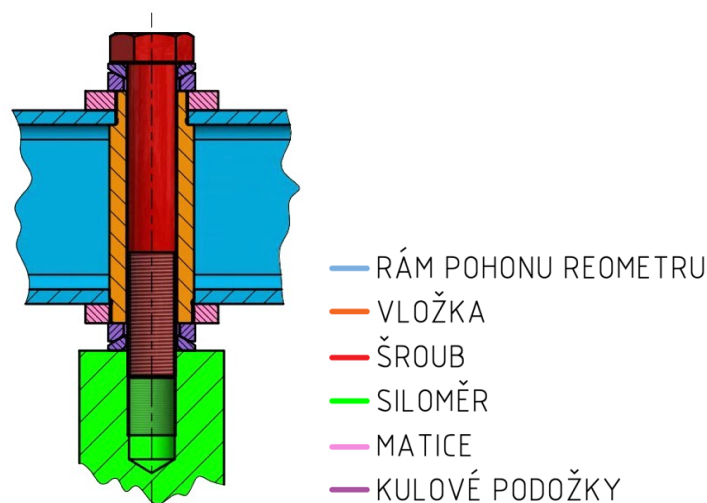
Ke spojení rámu pohonu reometru se siloměrem je jedinou možností použít šroub, který prochází jeho spodním profilem. Bylo uvažováno použití vložky v tomto profilu, která slouží k lepšímu rozložení namáhání na jeho jednotlivé části. Vzhledem k výrobním a montážním nepřesnostem jak rámu pohonu, tak rámové konstrukce, která je součástí hydraulického pulsátoru Inova, bylo vhodné uvažovat v obou variantách kulové podložky. Tyto podložky v kombinaci s vůlí mezi šroubem a dírou ve vložce umožní mírné natáčení rámu pohonu a tím umožní kompenzaci různých nepřesností. Vznikly dvě koncepce provedení této vložky.

První koncepce vložky je velmi jednoduchá – viz Obrázek 4-41. Vložku tvoří trubka, která je ve spodním profilu rámu pohonu reometru navařena. Díky tomu jsou vždy zatěžovány obě stěny profilu nezávisle na směru protlačení kapaliny. Nevýhodou je, že vložka se už nedá demontovat. Demontáž vložky by mohla být potřeba v případě nutnosti zvětšit vůli mezi vložkou a šroubem.



Obrázek 4-41 Varianta navařené vložky

Druhá koncepce je velmi podobná, jediným rozdílem je, že je vložka zajištěna z obou stran maticemi – viz Obrázek 4-42. Na vložce je osazení, které rozloží působící zatížení na obě stěny profilu. To platí ale jenom pro jeden směr protlačení. Díky maticím, na které z obou stran dosedají kulové podložky, bude působící zatížení rozloženo na větší plochu profilu. Vložka je snadno demontovatelná, takže je možné jednoduše změnit vůli mezi vložkou a šroubem.



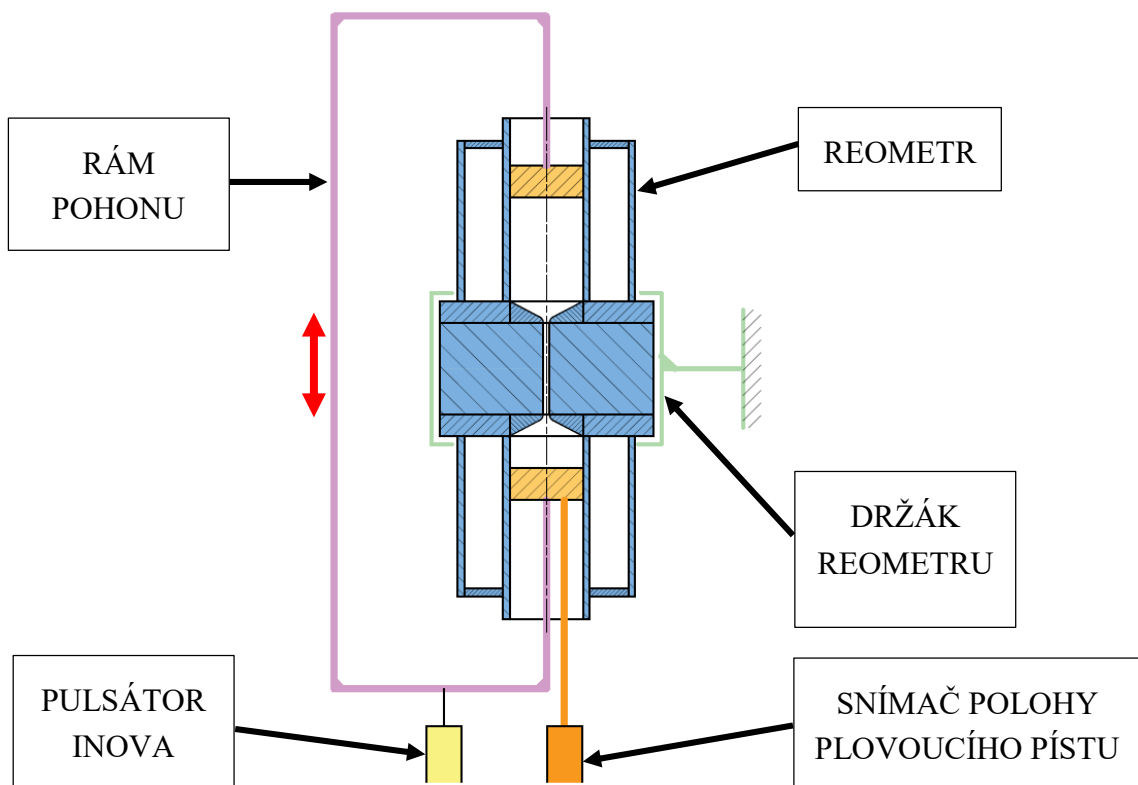
Obrázek 4-42 Varianta vložky jištěné maticemi

4.4 Měření polohy plovoucího pístu

Měření polohy plovoucího pístu je klíčové pro vyhodnocení měření. Dá se tvrdit, že na záznamu polohy plovoucího pístu v závislosti na čase stojí současná patentovaná metoda vyhodnocení.

U poslední (třetí) evoluce slit-flow reometru bylo měření polohy plovoucího pístu provedeno pomocí lineárního potenciometrického snímače upevněného v blízkosti reometru. Toto řešení nebylo příliš vhodné, protože hrozilo poškození snímače během manipulace s reometrem. Navíc kvůli špatné uživatelské přívětivosti a dalším problematickým oblastem bylo nutné navrhnout celý pohon reometru znovu. Snímač polohy plovoucího pístu proto už nebylo možné uchytit podle původního řešení a bylo nutné jej vylepšit.

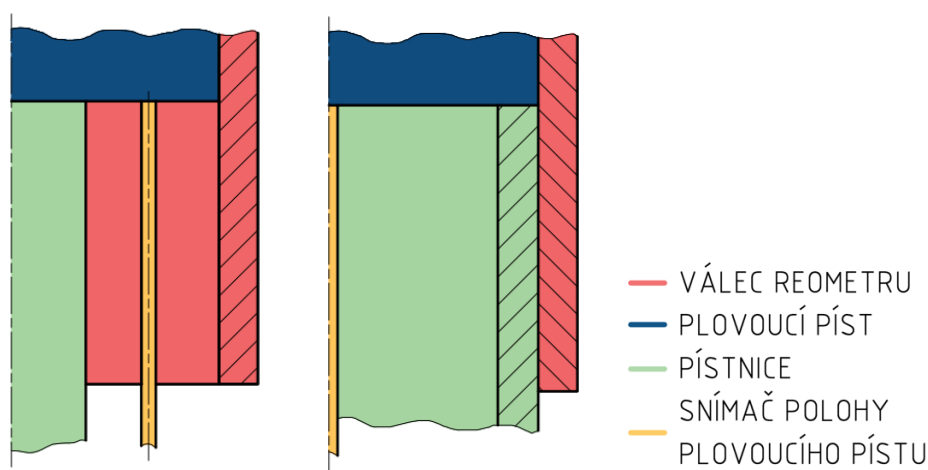
Aby bylo měření přesné, je velmi důležité v měřicím řetězci eliminovat vůle a různé pružné členy, stejně tak zajistit dostatečně tuhé uložení snímače polohy a taky reometru. Nejvýhodnější pro přesné měření je přímé napojení snímače na plovoucí pístu. Možný způsob umístění snímače polohy plovoucího pístu zobrazuje Obrázek 4-43.



Obrázek 4-43 Schéma celého zařízení

K upevnění držáku snímače poslouží vodící tyč, je ale možné také uvažovat horní ráhno, které je součástí rámové konstrukce lineárního aktuátoru ve školní laboratoři (viz např. Obrázek 4-27). Toto jsou jediné dobře přístupné nehybné prvky konstrukce. Jiné uchycení by vyžadovalo další součásti, které by stejně musely být připevněny na pevné části konstrukce. Jakékoliv uchycení přímo na reometr by nebylo vhodné, protože by překázelo při jeho montáži a demontáži do držáku. Dále v téhle kapitole bylo řešeno především spojení snímače s plovoucím pístem, konstrukční řešení jeho držáku je umístěno rovnou do konstrukční části, protože tento držák vzniknul díky své jednoduchosti bez variant – viz kapitola 5.5.1.

Prostor k napojení snímače na plovoucí píst ovlivňuje pouze pístnice, proto se mohou uvažovat dva způsoby jeho napojení – viz Obrázek 4-44. Nehraje přitom roli, jestli bude snímač napojen na horní nebo spodní plovoucí píst reometru. U obou způsobů se uvažovalo přichycení snímače na plovoucí píst pomocí magnetu, což velmi zjednoduší jeho montáž nebo demontáž. Stejně přichycení se používalo na třetí evoluci slit-flow reometru.



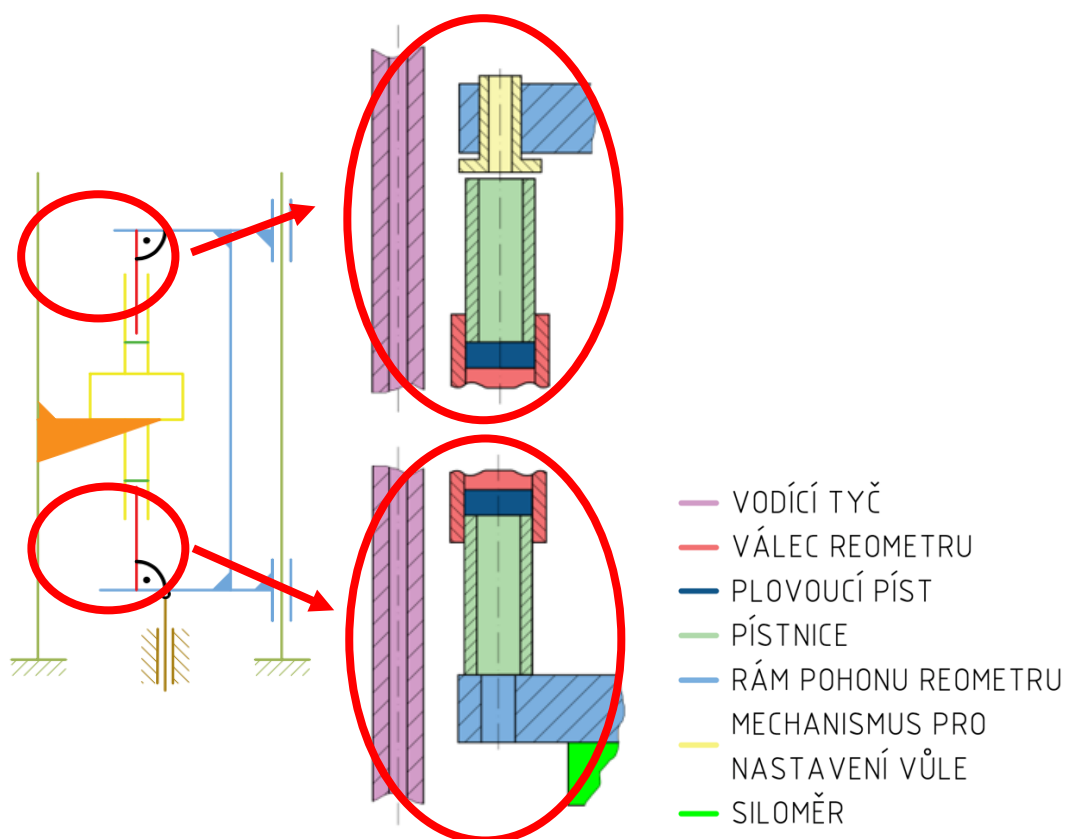
Obrázek 4-44 Vlevo: vedení snímače mezi pístnicí a válcem; vpravo: vedení snímače skrz dutou pístnici

Je možné použít malý průřez pístnice a připojení snímače řešit v prostoru mezi ní a stěnou válce – viz Obrázek 4-44 vlevo. Toto řešení přináší ale hned několik komplikací. Tou první je fakt, že pístnice musí být uložena v rámu pohonu reometru. Pevně uložená pístnice bude potom komplikace při vkládání reometru do držáku nebo při jeho vyjímání. Zároveň ale musí mít pístnice nastavitelnou polohu pro přizpůsobení se různým objemům kapaliny a taky musí umožnit nastavení vůle pro kompenzaci tepelné dilatace kapaliny. Konstrukce by tak musela být poměrně komplikovaná. Další komplikace je v prostoru, který zbyde mezi pístnicí a stěnou válce. Jelikož válec má daný rozměr 32 mm a budou zde působit relativně velké síly, pístnice tomu musí být uzpůsobena, aby nedošlo například k dosažení mezního stavu vzpěrné stability. Zbývající prostor pro připevnění snímače tak nemusí být dostatečný.

Další přístup je založen na použití duté pístnice – viz Obrázek 4-44 vpravo. Její průměr lícuje s vnitřním průměrem válce a bude v něm tak vedena. To je velká výhoda, protože v rámu pohonu reometru už nemusí být nijak upevněná a pro funkci postačí pouze kontakt čelní plochy pístnice s plochou rámu pohonu reometru. Použitím polotovaru tyče tažené za studena bude docíleno i potřebné přesnosti a zjednoduší se tak výroba. Při montáži reometru do držáku to tak přinese zjednodušení. Díky relativně velkému průměru může být pístnice dutá a díky tomu bude možné řešit uchycení snímače na plovoucí píst skrz ni. Takto řešená pístnice bude mít velkou štíhlost, aby nebylo možné dosáhnout mezní stav vzpěrné stability, a zároveň poskytne prostor pro uchycení snímače.

Při zhodnocení obou variant vyplývá, že výrazně lepší je varianta s dutou pístnicí. V koncepčních návrzích rámu pohonu reometru proto byla uvažována pouze dutá pístnice. Díky tomu, že pístnice je vedena stěnou válce reometru, bude zajištěno působení síly na plovoucí píst přesně v jeho ose. Mezi ní a rámem pohonu reometru nebude pevná vazba a díky tomu se odstraní vliv výrobních a montážních nepřesností a usnadní se proces vkládání reometru do držáku.

Jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, snímač je možné připevnit buď na horní, nebo na spodní plovoucí píst – viz Obrázek 4-45. V obou případech byl na obrázku už uvažován rám pohonu reometru, který bez ohledu na jeho koncepční varianty (viz Obrázek 4-27) musí být přítomen pro opření pístnic. Aby bylo tedy možné vést snímač skrz dutou pístnici, musí být díra i v rámu pohonu reometru. Při napojení snímače na horní plovoucí píst by navíc musela být i díra v posuvném mechanismu. Kvůli tomu by musel mít větší rozměry a zkomplikovala by se jeho konstrukce. Oproti tomu vedení snímače na spodní plovoucí píst neovlivní žádné další součásti a bude stačit jenom díra v rámu pohonu reometru.



Obrázek 4-45 Vedení snímače, nahoře: na horní plovoucí píst, dole: na spodní plovoucí píst reometru

Je však nutné poznamenat, že vedení snímače na spodní plovoucí píst je možné pouze u varianty s držákem reometru uchyceným na jedné vodící tyči. Pokud by se reometr nacházel v ose lineárního aktuátoru, tak by takové vedení snímače nebylo možné kvůli upevnění siloměru, se kterým by snímač kolidoval.

Pro měření je možné použít buď lineární potenciometrický snímač, nebo snímač lankový. U lankového snímače se nemusí řešit jeho uchycení, protože se dodává včetně držáku, který stačí jenom přišroubovat. Použití lineárního potenciometrického snímače je výhodné, protože se již používal na třetí evoluci reometru a nemusí se proto kupovat. Je ale nutné pro něj vyrobit ještě kompletní držák, aby jej bylo možné přichytit na vodící tyč.

5 KONTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5.1 Určení maximálního provozního zatížení

Jak již bylo zmíněno dříve, vyvíjený slit-flow reometr bude používat stejné snímače tlaku a teploty, jako jeho předchozí evoluce. Díky tomu se ušetří finance, protože bude možné použít již zakoupené snímače. Tlakoměry jsou od firmy HBM, typ P8AP, a je možné je koupit v rozsahu maximálních tlaků od 10 bar do 500 bar. Tlakoměry mají stejné přípojovací a celkové rozměry nezávisle na velikosti maximálního měřitelného tlaku.

Vnitřní průměr válce reometru zůstal stejný, jako na předchozí evoluci slit-flow reometru (průměr 32 mm). Při známém průřezu válce S_p se snadno spočítá maximální síla F_{\max} , kterou může lineární aktuátor na píst působit při konkrétním použitém snímači až do maximálního tlaku p_{\max} – viz rovnice (5-1). Ve výpočtu byl zahrnut i součinitel bezpečnosti k_p , jehož hodnota byla zvolena 1,3. Díky tomuto součiniteli nemůže dojít k přetížení a tedy i ke zničení tlakoměrů.

$$F_{\max} = \frac{p_{\max}}{k_p} S_v \quad (5-1)$$

kde F_{\max} je maximální velikost síly od lineárního aktuátoru v N, p_{\max} je maximální tlak v reometru v Pa, k_p je součinitel bezpečnosti pro tlakoměry a S_v je plocha průřezu válce v m^3 .

Tabulka 5-1 zobrazuje hodnoty maximální síly pro jednotlivé tlakoměry. Výpočet byl proveden podle rovnice (5-1). Do řídicího programu se tato hodnota zadá a po jejím dosažení se lineární aktuátor vypne.

Tabulka 5-1 Maximální síla pro jednotlivé tlakoměry (zaokrouhleno)

Tlakoměr HBM P8AP (bar)	Maximální dovolená síla na píst reometru (N)
10	619
20	1237
50	3093
100	6186
200	12373
500	30933

Je vidět, že při použití tlakoměru do 500 Bar je maximální síla lineárního aktuátoru extrémně velká. Kvůli tomu by celá konstrukce musela být velmi masivní, a proto je použití tohoto tlakoměru vyloučeno. Pro měření kapalin tak bude možné použít maximálně tlakoměr do 200 bar. Vzhledem k variabilitě tloušťky štěrbin je proto takový rozsah měřitelných tlaků naprosto dostatečný i pro velmi viskózní kapaliny.

Provozní síla, kterou bude konstrukce namáhána, závisí na mnoha faktorech – použité tlakoměry, viskozita kapaliny (vlivem zahřívání kapaliny bude klesat a proto bude klesat i síla nutná k protlačení), průřez štěrbin, rychlost protlačování, v případě MR kapalin navíc ještě intenzita magnetického pole, velikost MR efektu atd.

V kapitole 3.2.1 bylo zdůvodněno zavedení součinitele k_p , který má zabránit přetížení tlakoměrů při rázech během protlačení. V této kapitole se s ním pracuje a jeho hodnota byla zvolena 1,3. Tuto zvolenou hodnotu je ale možné podle potřeby dále měnit, proto bylo stanoveno maximální provozní zatížení celé konstrukce 15 kN. Je ale reálné, že velikost síly bude u většiny měření menší a jen v ojedinělých případech se bude blížit této maximální hodnotě.

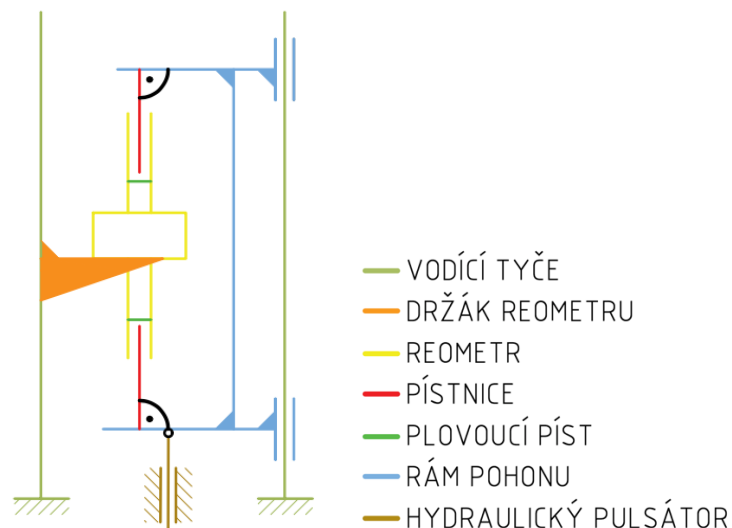
Frekvence předpokládaného využití zařízení budou řádově jednotky měření týdně při přibližné průměrné délce trvání do 5 minut. Odhad délky trvanlivostních zkoušek MR kapalin může být ale delší – závisí na životnosti dané kapaliny. I tak se ale nepředpokládá, že zařízení během své životnosti vykoná při plném zatížení 15 kN počet cyklů větší než 10^6 . Vyhodnocování bezpečnosti navržené konstrukce vůči meznímu stavu únavy je proto velmi konzervativní přístup.

5.2 Geometrická závislost mezi rámem pohonu reometru, reometrem a jeho držákem

Ještě před popisem konstrukce jednotlivých částí je důležité uvést geometrickou závislost mezi nimi. V kapitole 4.4 bylo vysvětleno a zdůvodněno použití dutých pístnic, které vedou stěny válců reometru a o rám pohonu reometru se opírají pouze svými čelními plochami. Díky tomu bude na plovoucí písky působit zatížení přesně v jejich ose. Aby ale byl celý reometr zatěžován v ose a nevznikaly zde jiné než axiální síly, bylo nutné zajistit, že pístnice dosednou na rám pohonu celými svými čelními plochami.

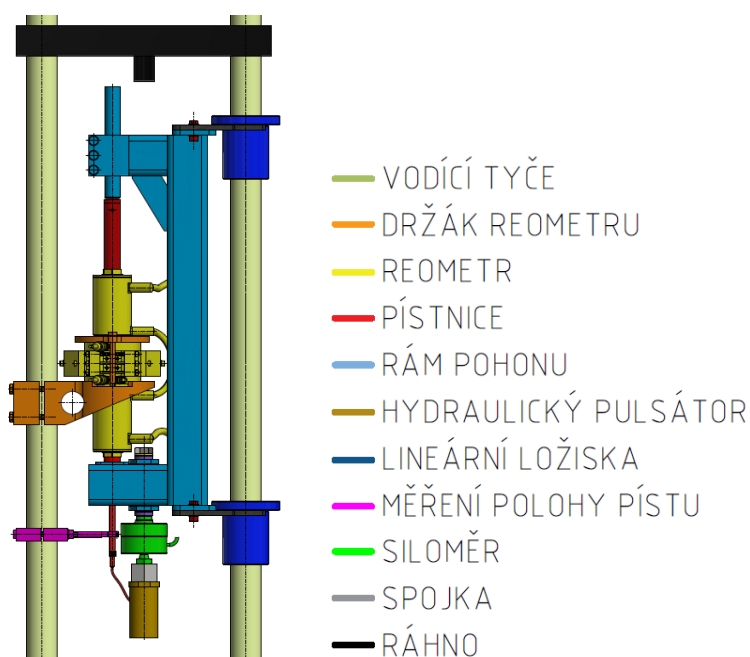
Mezi pístnicemi a rámem pohonu reometru není pevná vazba. Díky tomu se usnadní manipulace s reometrem během jeho vkládání nebo vyjímání. Hlavní výhodou ale je, že díky tomu vzniká nezávislost na montážních a výrobních nepřesnostech rámu pohonu nebo držáku. Je potřeba zajistit jenom kolmost mezi osami pístnic vzhledem k dosedacím plochám.

Pro přehlednější znázornění a vysvětlení bylo využito kinematické schéma – viz Obrázek 5-1. Na základě tohoto schéma je patrné, že kolmost osy pístnic vůči dosedacím plochám na rámu pohonu je ovlivněna jak přesností držáku, přesností reometru a přesností rámu pohonu, tak také rovnoběžností os vodících tyčí.



Obrázek 5-1 Kinematické schéma pohonu reometru

Jak zobrazuje Obrázek 5-2, obě vodící tyče nahoře spojuje ráhno. Toto ráhno je možné na tyčích posouvat. Celá konstrukce s hydraulickým pulsátorem Inova byla navíc navržena [9] pro posuvný příčník, který se na vodících tyčích pohybuje. Kvůli tomu už byly kladeny zvýšené požadavky na přesnost uložení vodících tyčí a v tomto návrhu je proto možné osy vodících tyčí považovat za rovnoběžné. Osa lineárního aktuátoru není rovnoběžná s vodícími tyčemi, tuto mírnou odchylku ale vyřeší kulové podložky na vložce rámu pohonu (viz kapitola 4.3.2).



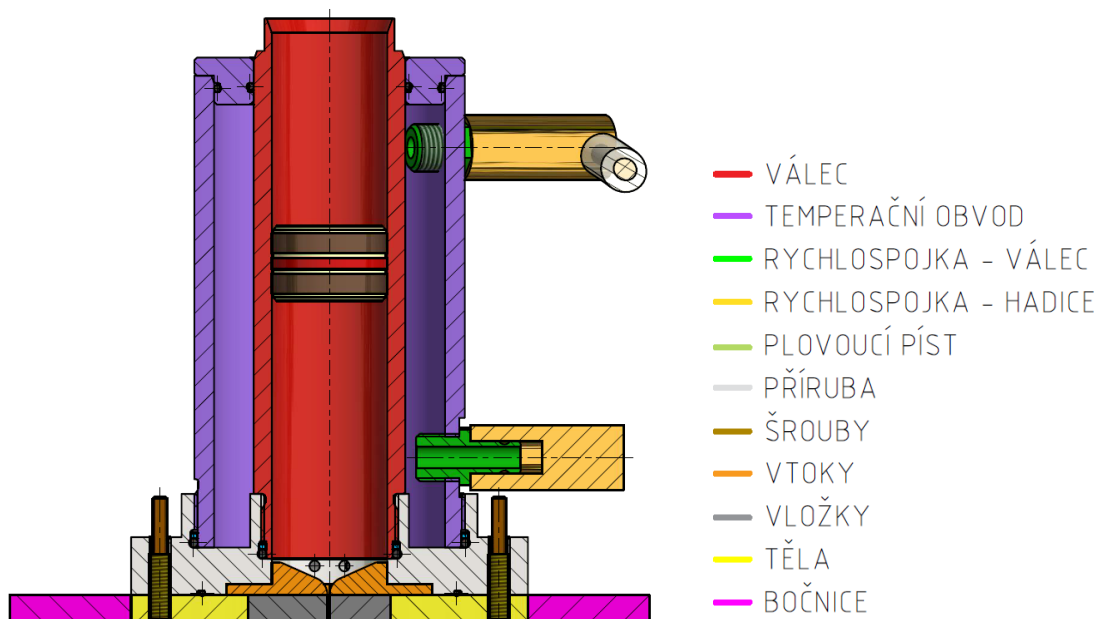
Obrázek 5-2 Celková konstrukce

Kolmost os pístnic vzhledem k dosedacím plochám na rámu pohonu proto kladou zvýšené požadavky na přesnou výrobu všech součástí pohonu včetně reometru a jeho přesného usazení v držáku. Během montáže je navíc důležité zajistit přesné ustavení částí pohonu vzhledem k vodícím tyčím. Rám pohonu i držák reometru navíc musí mít dostatečnou tuhost, aby vlivem elastických deformací během protlačení kapaliny nedošlo k významnému ovlivnění zmíněné kolmosti.

5.3 Reometr

Reometr byl první konstrukční uzel, který se vyvinul. Na základě jeho rozměrů následně vznikl finální návrh jeho držáku a rámu pohonu. Stejně jako v koncepčních variantách jednotlivých částí reometru, i zde se postupovalo postupně v závislosti na návaznosti jednotlivých součástí. Opět se tedy začínalo nemagnetickým tělem, resp. magnetickým obvodem se štěrbinou.

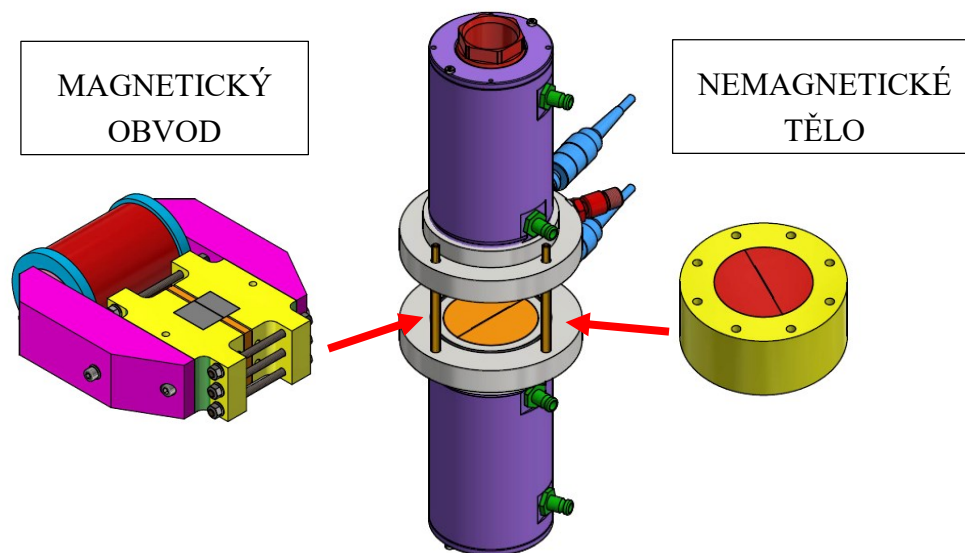
Na celém vyvinutém reometru, včetně jeho magnetického obvodu, se uvažovaly pouze šrouby s válcovou hlavou o velikosti závitu M6. Díky tomu se zjednoduší proces skládání nebo rozdělování, protože k tomu bude potřeba pouze jeden nástroj. Rozměr tohoto závitu byl zvolen. Jediným úkolem spojovacích šroubů je totiž držet reometr pohromadě, během měření nejsou šrouby zatěžovány, protože je reometr pro oba směry protlačení pouze stlačován. Obrázek 5-3 poskytuje pro lepší představu pohled na řez reometru s použitým magnetickým obvodem. Byla zobrazena pouze jeho horní část, protože reometr je symetrický.



Obrázek 5-3 Horní část reometru v řezu

5.3.1 Magnetický obvod a nemagnetické tělo se štěrbinou

Jak již bylo dříve zmíněno, na vyvíjeném reometru bude možné použít jak magnetický obvod pro měření MR kapalin, tak nemagnetické tělo pro ostatní kapaliny. Obě tyto části jsou záměnné a vyvinutý slit-flow reometr je tak možné složit do dvou základních konfigurací – viz Obrázek 5-4.



Obrázek 5-4 Základní dvě konfigurace vyvinutého slit-flow reometru

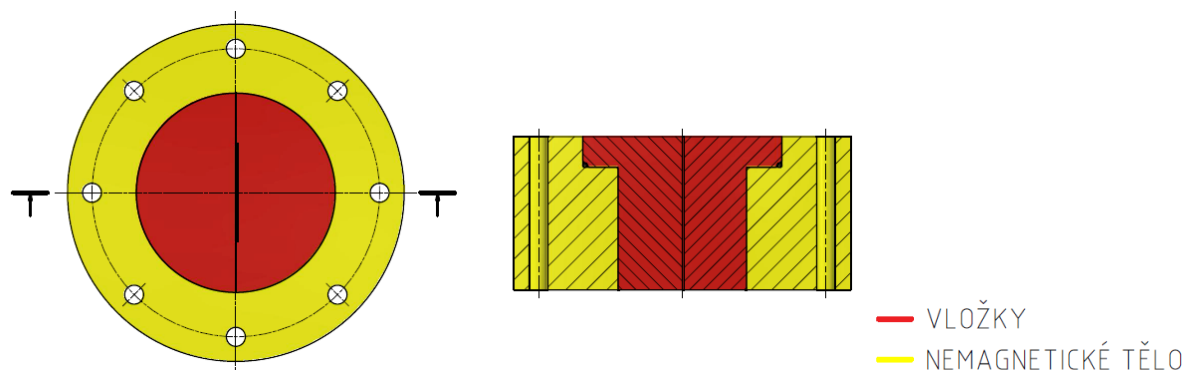
Štěrbiný v magnetickém obvodu i v nemagnetickém těle budou tvořeny výměnnými vložkami. Díky tomu je možné rozšířit možnosti výzkumu (např. změnou drsnosti stěn, materiálu stěn, tloušťky štěrbin), během výroby bude navíc možné dodržet drsnost a geometrickou přesnost a také je bude možné po opotřebení snadno vyměnit. Odpadne tedy nutnost výroby celého těla znovu, postačí pouze vložky.

Tyto požadavky platí pro nemagnetické tělo i pro magnetický obvod. Navržené řešení musí být použitelné i pro různé délky štěrbin. V návrzích se pracovalo s maximální předpokládanou délkou štěrbin, která je 50 mm. Tato délka se uvažovala při výrobě nemagnetického i magnetického obvodu.

Nemagnetické tělo

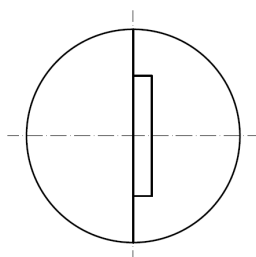
Výsledná konstrukce nemagnetického těla se skládá z obou představených koncepčních variant – viz Obrázek 5-5. Vložky mají osazení, díky kterému bude možné použít kolík pro zajištění jejich přesné orientace v nemagnetickém těle. Nejprve se ale vyzkouší varianta tak, jak je zobrazena – bez kolíku. Orientace vložek vůči vtokům v přírubách se nastaví při montáži. Tento postup stojí za vyzkoušení, protože je možné, že bude pohodlnější a rychlejší. Pokud by tomu tak bylo, tak při výrobě dalších kusů nemagnetického těla (např. s jinou délkou štěrbin) by se mohlo rovnou přikročit k výrobně jednodušší variantě bez osazení.

V těle bylo přichystáno 8 otvorů pro šrouby, které se používaly na slit-flow reometru třetí evoluce. Nemagnetické tělo bylo totiž vyrobeno jako jedno z prvních součástí, proto se uzpůsobilo i starému reometru, aby mohla proběhnout měření. Nový reometr využije pouze čtyři otvory pro šrouby.



Obrázek 5-5 Nemagnetické tělo

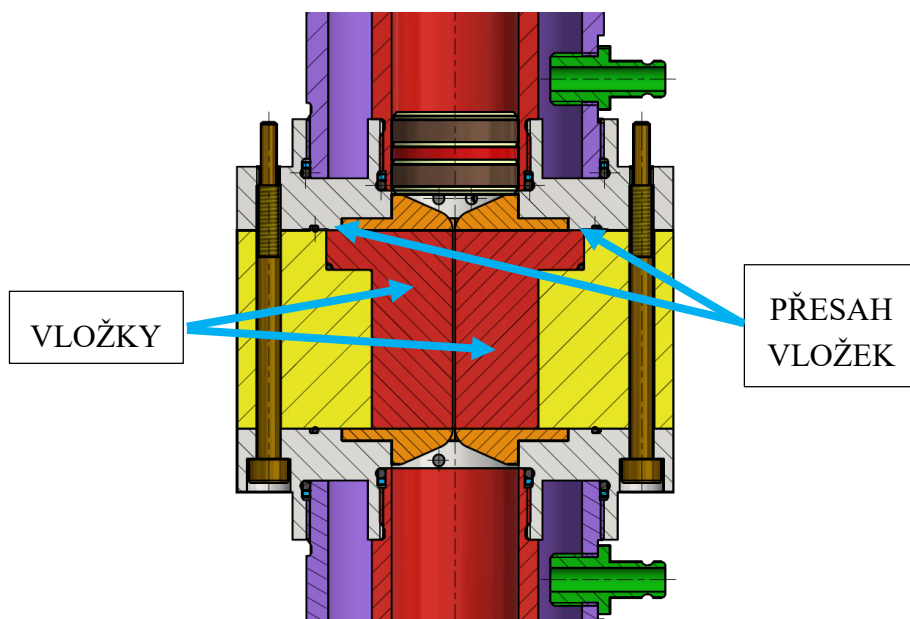
Z představených koncepčních variant provedení štěrby je jednoznačně výhodnější asymetrická štěrbina – viz Obrázek 5-6. Při změně tloušťky štěrby tak bude stačit vyměnit pouze jednu vložku s drážkou, druhá vložka bez drážky může zůstat. Stejně tak se zjednoduší výroba, protože drážka se bude vyrábět pouze v jedné vložce.



Obrázek 5-6 Asymetrická štěrbina, rozměr štěrby záměrně zvětšen

Je potřeba brát hned v úvahu také další prvky, které koncepce štěrby ovlivňuje. Jelikož na obou jejích stranách jsou plánované tzv. vtoky (viz Obrázek 5-7), tak i tyto vtoky budou muset být asymetrické. Nicméně to přináší stejnou výhodu, jako u vložek – zjednodušení výroby a při změně tloušťky štěrby bude stačit vyměnit pouze jeden vtok na každé straně štěrby. Dále se s asymetrií bude muset počítat i při návrhu magnetického obvodu.

Vložky budou v nemagnetickém těle usazeny velmi přesně s minimální vůlí, aby se zamezilo vzniku vzduchových kapes. Pro jejich zajištění ve směru protlačení kapaliny musí na straně osazení přesahovat vůči čelu nemagnetického těla – viz Obrázek 5-7. Během skládání reometru se z obou stran na nemagnetické tělo přitáhnou příruby, které díky přesahu zajistí i vložky v těle. Díky tomu bude znemožněn jejich pohyb ve směru toku kapaliny a také nebude možná jejich rotace během měření.

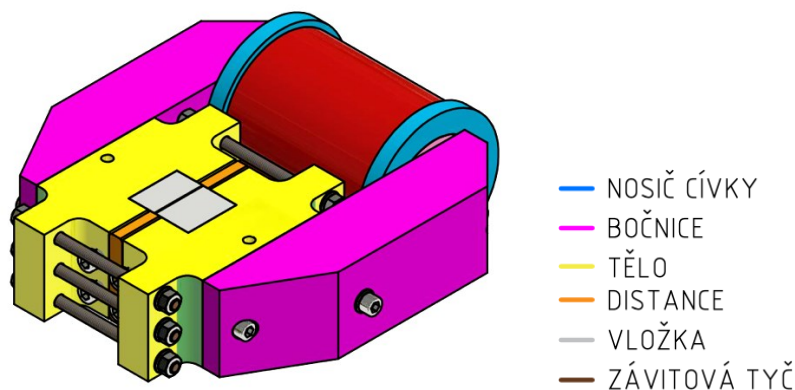


Obrázek 5-7 Vyvinutý reometr s nemagnetickým tělem

Magnetický obvod

Z představených koncepčních variant úpravy magnetického obvodu je jednoznačně lepší varianta druhá, která je zde dále rozebrána. Ačkoliv má složitější geometrii obou těl, její velkou výhodou je možnost měnit vložky tvořící štěrbinu bez potřeby rozebírat celý magnetický obvod. Dále navíc mají vložky jednoduchý tvar, který nijak nekomplikuje jejich výrobu a zůstala zachována tloušťka distancí.

Obrázek 5-8 zobrazuje pohled na finální konstrukci magnetického obvodu. Oproti původní geometrii založené na simulacích magnetického toku největší změna spočívá v přidání drážce pro vložky spolu s jistícími šrouby pro vložky. Tyto jistící šrouby (viz Obrázek 5-9) zajišťují polohu vložek pouze pro manipulaci, jejich poloha během protlačení bude jištěna jinak. Poslední změnou je použití celkem šesti závitových tyčí místo původních čtyř, které slouží ke stažení obou těl k sobě. Díky tomu se zajistí rovnoměrnější přítlak na distance, zvětší se celková přítlačná síla a síla vzniklá od tlaku kapaliny na vložky se rozloží mezi více tyčí.



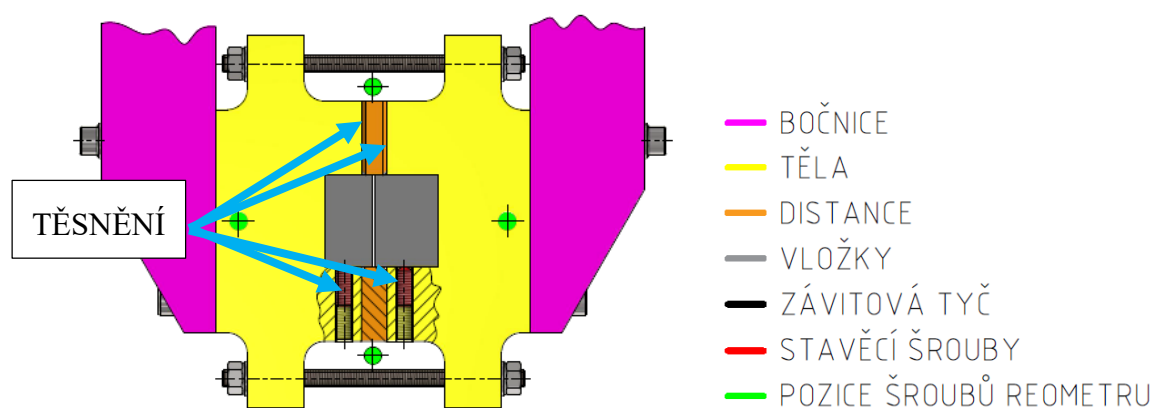
Obrázek 5-8 Výsledná konstrukce magnetického obvodu

Celý magnetický obvod byl vyroben z behanitu, což je magneticky měkký materiál. Pouze nosič cívky je plastový, aby se ušetřila hmotnost. Všechny šrouby jsou navíc velikosti M6, což je unifikovaný rozměr na celém reometru.

Co se těsnění týče, tak je možné jednotlivé oblasti snadno utěsnit. Obrázek 5-9 zobrazuje tyto oblasti. Jak již bylo popsáno v koncepční variantě, k utěsnění stavěcích šroubů vložek se může aplikovat buď teflonová páska, nebo tekuté těsnění. Dále mezi těly a distancemi bude k těsnění napomáhat plošné těsnění, konkrétně Loctite MR 5922. Toto plošné těsnění odolává většině kapalin a také vysokým teplotám. Tento utěsněný spoj nebude nutné při běžném provozu rozebírat.

Aby bylo možné k těsnění mezi magnetickým obvodem a přírubami použít o-kroužek, musí být povrch magnetického obvodu zbroušen do roviny. Broušení bude tedy provedeno až po složení součástí. Díky tomu, že při výměně vložek se nemusí magnetický obvod rozdělovat, zůstane zbroušená rovina zachována i po výměně vložek, což je velká výhoda.

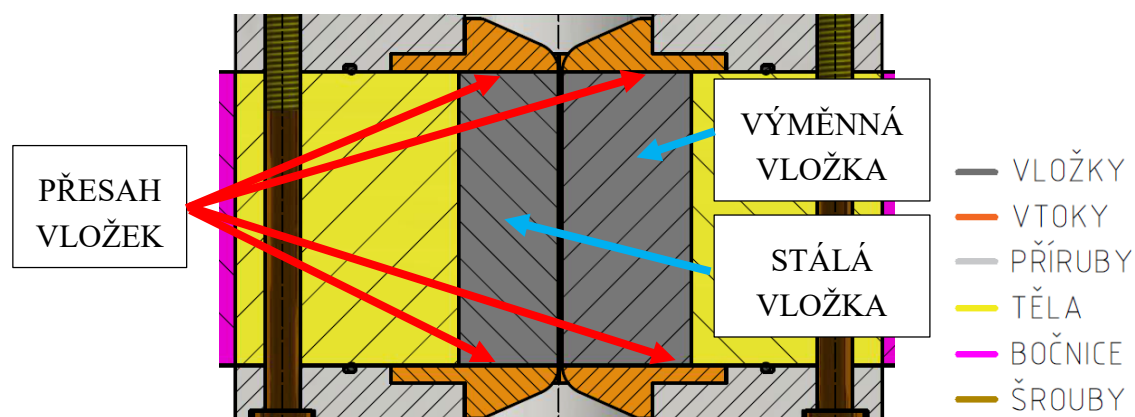
Obrázek 5-9 poskytuje pohled na vyřešení pozic čtyř šroubů, které drží reometr pohromadě. Dvě díry, které prochází skrz těla, se budou vrtat až jako jedna z posledních operací na složeném magnetickém obvodu. Díky tomu budou díry vyvrtané přesně a také se zjednoduší výroba, jejich rozteč totiž ovlivňuje přesnost mnoha rozměrů, což by vedlo na příliš přísné výrobní tolerance.



Obrázek 5-9 Pohled na jistící šrouby vložek

Jak již bylo zmíněno dříve, stavěcí šrouby jistící vložky zajišťují jejich polohu pouze během manipulace s magnetickým obvodem. Během provozu jsou vložky zajištěny pomocí přírub s vtoky – viz Obrázek 5-10. Vložky budou mít totiž vůči tělům malý přesah, takže se během skládání reometru sevrou mezi obě příruby s vtoky.

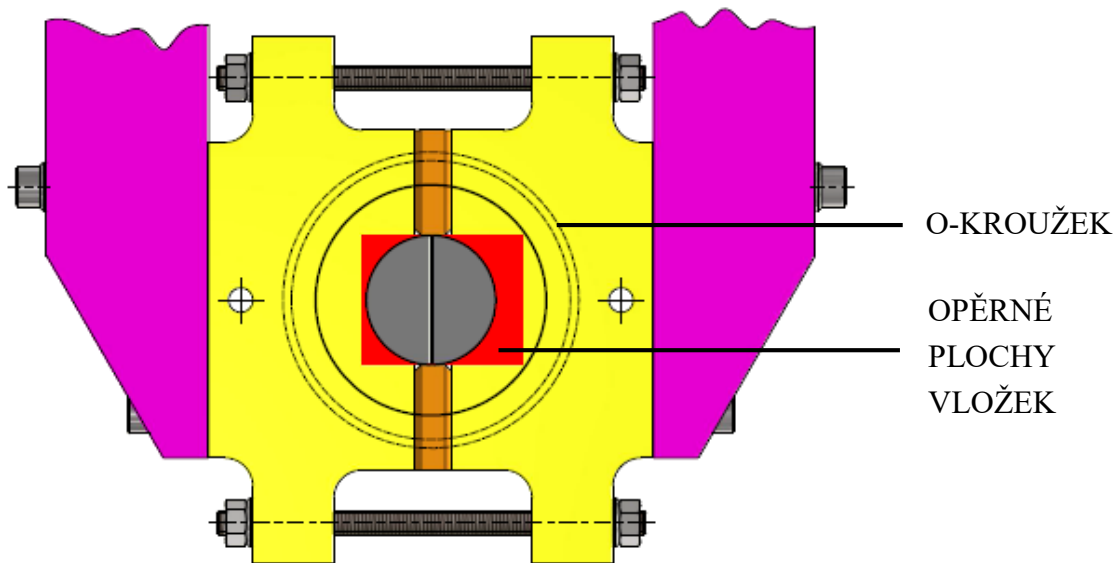
Tloušťka vložek byla záměrně volena odlišná, aby bylo na první pohled patrné, která je určena k výměně při změně tloušťky štěrbin. Použitá asymetrie štěrbin (viz předchozí kapitola) tuto konstrukci nijak neovlivní, tvar součástí bude stejný, jenom vyosený. Avšak musí se s ní počítat, protože magnetický obvod bude záměnný s nemagnetickým tělem. Zde je tenčí vložka určena jako neměnná a tloušťka štěrbin se bude volit změnou druhé vložky. Tenčí vložka byla zvolena co nejtenčí, ale bral se ohled na způsob jištění šroubem. Díky jednoduchému tvaru vložek je možné jejich oboustranné používání, přičemž na každé straně může být jiná drsnost. V tomto případě by se ale musela drsnost na obou stranách označit, např. gravírováním z čelní strany.



Obrázek 5-10 Zajištění vložek magnetického obvodu

V rámci této práce se vyrobily pouze vložky o jedné drsnosti pro jednu tloušťku štěrbin k ověření funkčnosti. Další vložky se již budou navrhovat na základě zkušeností z měření a podle dané potřeby. Vložky musí být vyrobeny z magneticky měkkého materiálu, aby si po působení magnetického pole neuchovaly zbytkový magnetismus. Z tohoto důvodu budou vyrobeny z behanitu, což je materiál, ze kterého je vyroben celý magnetický obvod.

Obrázek 5-11 poskytuje pohled na horní stranu, kde je vidět vyznačená poloha okroužku, který bude těsnit dosednuté příruby. Dále je zde tlustými čarami vyznačena oblast pro vtoky. Červeně jsou zvýrazněny opěrné plochy, které zajistí polohu vložek po složení reometru. V oblasti červených ploch je nad vložkami z obou stran 13 mm plného materiálu (příruba + vtoky) – viz Obrázek 5-10.



Obrázek 5-11 Pohled na opěrnou plochu vložek

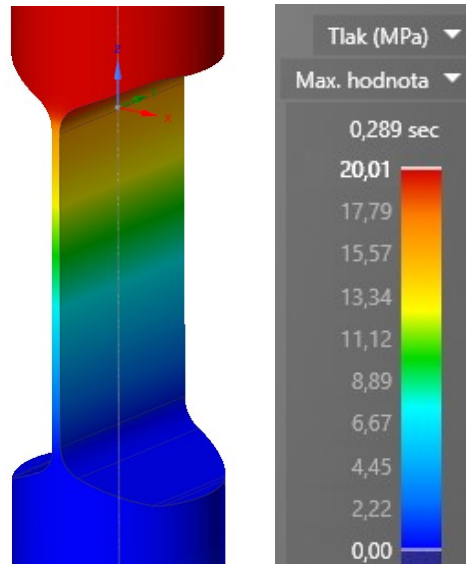
K výrobě magnetického obvodu se použila kulatina z behanitu o průměru 150 až 200 mm, která byla k dispozici ve školní laboratoři. Z kulatiny se technologií elektroerozivního obrábění nadělily polotovary pro výrobu jednotlivých součástí. Výroba těchto součástí proběhla subdodávkou, ve školní dílně se vyrobily pouze distance s následným zabroušením dosedacích ploch přírub a vrtáním. Vzhledem k tomu, že ve školní dílně není bruska vhodná k broušení barevných kovů, musely být distance z nemagnetické nerezové oceli. Barevné kovy by při broušení totiž zanášely kotouč a broušení by tak nebylo možné. Mosazné distance by ale byly vhodnější z důvodu nulového magnetického toku. Ke stažení těl k sobě se použily mosazné závitové tyče.

Výpočty

Nemagnetický obvod byl navržen z masivního kusu oceli, proto se pevnostní kontrola týkala hlavně magnetického obvodu, kde by mohlo dojít k přetížení mosazných závitových tyčí, které drží obě poloviny obvodu pohromadě. Tyto tyče musí vyvodit potřebnou normálovou sílu, aby distance mezi těly pevně držely, a také musí zachytit zatížení od působení tlaku na stěny štěrbinou.

V kapitole 5.1 se jako maximální provozní tlak určila hodnota 200 bar. Tato hodnota ale bude přítomna pouze v jednom válci nad nebo pod štěrbinou, v závislosti na směru protlačování. Navíc je reálné, že tak vysokých tlaků se bude dosahovat pouze při měření MR kapalin v aktivovaném stavu. Během průtoku kapaliny bude tlak ve štěrbině menší. To je způsobeno zejména náhlým zvýšením rychlosti proudící kapaliny (viz zákon zachování mechanické energie – Bernoulliho rovnice). Dále vlivem tlakových ztrát bude tlak podél štěrbinou klesat. Velikost tlaku na výstupu kapaliny ze štěrbinou bude rovna hodnotě, která je potřebná pouze pro posuv plovoucího pístu ve druhém válci. Oproti maximálnímu hnacímu tlaku 200 bar bude tlak ve druhém válci zanedbatelný.

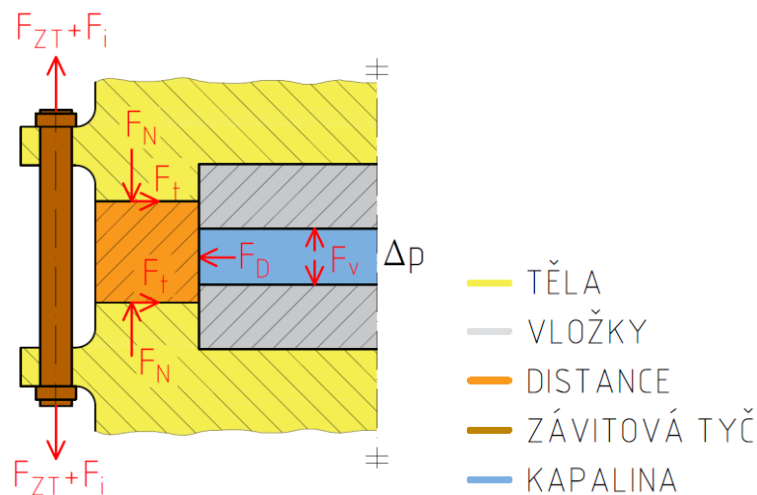
Teoretický průběh tlaku podél štěrbiny je pro lepší představu graficky znázorněn – viz Obrázek 5-12. Simulace proběhla v programu ANSYS Discovery Life pro olej s hustotou 889 kg/m^3 a dynamickou viskozitou $1,06 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ při rychlosti pístu $2,8 \text{ m/s}$. Díky tomu vznikl v horním válci požadovaný tlak 200 bar .



Obrázek 5-12 Průběh tlaku ve štěrbině

Pro pevnostní kontrolu magnetického obvodu se proto neuvažoval tlak ve štěrbině o jeho maximální hodnotě 200 bar , ale uvažovala se jeho polovina. Nezohledňovalo se nerovnoměrné zatížení, protože obě těla a obě distance jsou sevřeny mezi přírubami (viz Obrázek 5-10) a mohou se proto pouze vysouvat směrem od štěrbin.

Obrázek 5-13 zobrazuje polovinu magnetického obvodu se zvýrazněným silovým působením. Na základě výpočtu (viz příloha 12.1.1) bylo určeno, že normálová síla na jednu distanci musí být alespoň $F_N = 2,5 \text{ kN}$, aby mezi těly byla dostatečná třecí síla. V tomto výpočtu byl podceněn vliv tekutého těsnění mezi distancemi a těly. Jednu závitovou tyč je možné předepnout až na $F_i = 2,4 \text{ kN}$ před dosažením mezního stavu pružnosti (viz příloha 12.1.2). Zároveň bylo spočítáno (viz příloha 12.1.2), že během protlačení bude jedna závitová tyč kvůli tlaku ve štěrbině namáhaná krom předpětí ještě silou $F_{ZT} = 2,7 \text{ kN}$.



Obrázek 5-13 Silové poměry v magnetickém obvodu

Výpočty pro určení síly F_{ZT} proběhly zjednodušeně za předpokladu, že se zatížení rozloží rovnoměrně mezi všechny závitové tyče. Toto je totiž ta nejméně příznivá situace. Ve skutečnosti zde budou dva další vlivy, které sníží skutečnou sílu F_{ZT} . Tím prvním vlivem je samotný magnetismus. Jak již bylo zmíněno, tak vysokých tlaků se bude dosahovat pouze při měření MR kapalin v aktivovaném stavu. Obě vložky v magnetickém obvodu proto k sobě budou přitahovány. Dalším vlivem je přesah obou vložek vůči tělům (viz Obrázek 5-10). Při skládání reometru dosednou přírubby s vtoky na tyto distance a vznikne zde třecí síla, která také zmenší zatížení, které se mezi závitové tyče bude rozkládat. Na reometru jsou čtyři šrouby M6 pevnostní třídy 8.8. Jeden tento šroub je možné předepnout přibližně až na 8 kN [30].

V dalším výpočtu byla zvolena síla předpětí jedné závitové tyče $F_i = 1,5$ kN, což odpovídá celkové normálové síle na jednu distanci $F_N = 4,5$ kN. To je téměř dvojnásobek minimální teoretické normálové síly. Potřebný utahovací moment pro vyvození požadované síly předpětí byl spočítán v rovnici (5-2). Součinitel utahovacího momentu K byl určen v příloze 12.1.2.

$$M_u = K F_i d = 0,222 \cdot 1\,500 \text{ N} \cdot 0,006 \text{ m} = 2 \text{ Nm} \quad (5-2)$$

kde M_u je utahovací moment v Nm, K je součinitel utahovacího momentu, F_i je síla předpětí šroubů v N a d je velký průměr závitu v mm.

Mosazné závitové tyče budou nejvíce namáhány během měření, kdy na ně bude působit krom síly předpětí $F_i = 1,5$ kN ještě síla $F_{ZT} = 2,7$ kN. Jejich bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti se proto počítala při tomto stavu podle rovnice (5-3).

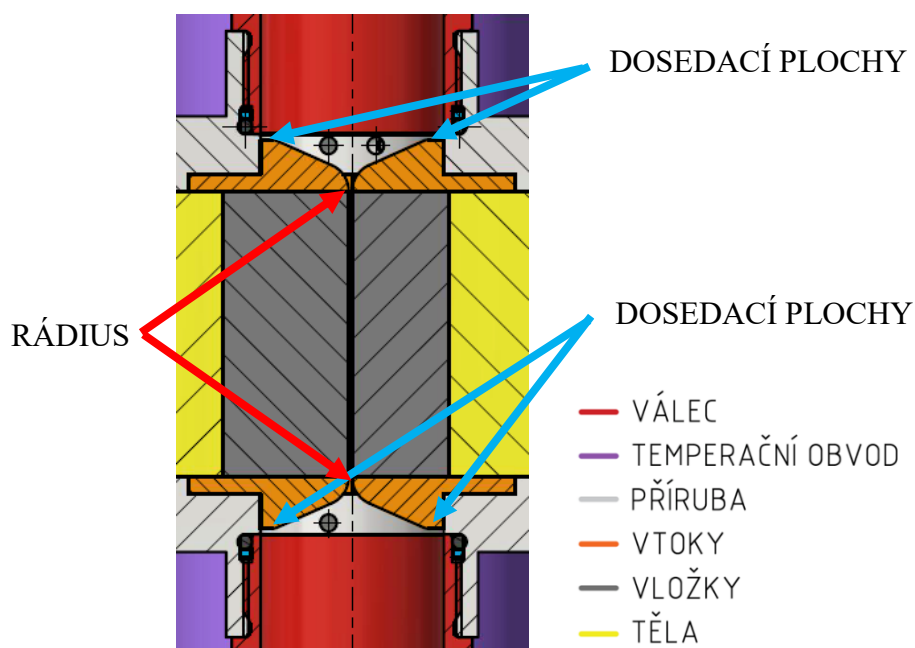
$$k_{\text{msp}} = \frac{Re A_s}{F_i + F_{ZT}} = \frac{320 \text{ MPa} \cdot 20,1 \text{ mm}^2}{1\,500 \text{ N} + 2\,700 \text{ N}} = 1,53 \quad (5-3)$$

kde k_{msp} je bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti, Re je mez kluzu materiálu v MPa, A_s je výpočtový průřez závitové tyče v mm^2 , F_i je síla předpětí v N a F_{ZT} je síla, která působí na jednu závitovou tyč vlivem tlaku ve štěrbině v N

Pokud by se uložení distancí projevilo jako nedostatečné a bylo nutné jej dodatečně upravit, byla ještě vypracována varianta se zajištěním vložky tvarovým stykem pomocí kolíku – viz příloha 12.1.4.

5.3.2 Vtoky

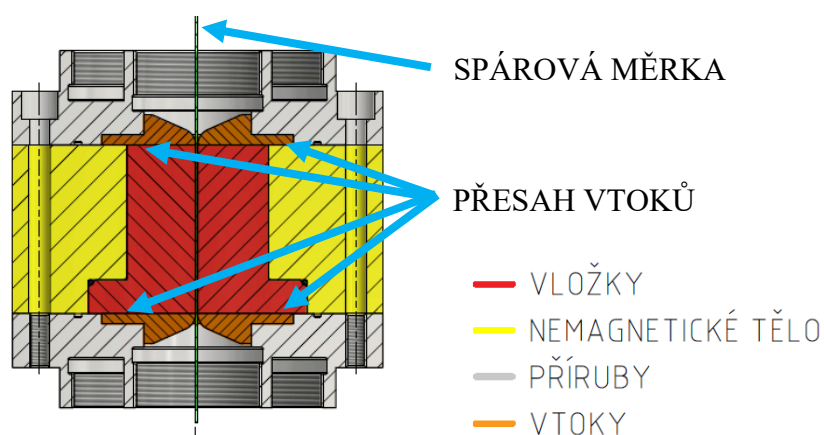
Vtoky byly umístěny na obou stranách štěrbiny a jejich hlavním úkolem je minimalizace vtokových ztrát do štěrbin. Navíc pomáhají rychlejší tvorbě rychlostního profilu. Obrázek 5-14 znázorňuje finální provedení vtoků na obou stranách štěrbiny. V kapitole 4.2.2 byly nastíněny základní geometrické požadavky, které musí vtoky splňovat. Jedná se zejména o dosedací plochy pro plovoucí písty, které slouží jako jejich dorazy. Dále vtoky musí mít rádius, který usměrňuje tok kapaliny před vstupem do štěrbiny. Tento rádius má prokázaný příznivý vliv na minimalizaci vtokových ztrát – viz kapitola 2.3.1.



Obrázek 5-14 Umístění vtoků v přírubě

Na každé straně štěrbiny byly vtoky rozděleny na dvě části. Obě tyto části jsou vloženy do zahlobení v přírubě a jsou s tímto zahlobením slícovány. Díky tomu nevznikne v zahlobení vzduchová kapsa, kterou by se během odvzdušňování nemuselo podařit odstranit. Mezi oběma částmi musí být přesně dodržena tloušťka odpovídající tloušťce štěrbiny, což kladlo zvýšené požadavky na přesnost výroby.

Orientace vtoků vůči přírubám je díky zahloubení dána jen částečně – vtoky se mohou ještě otáčet. V tomto konstrukčním návrhu bylo vyřešeno přesné ustavení polohy vtoků včetně přírub pomocí spárových měrek – viz Obrázek 5-15. Při skládání reometru se spárová měrka vsune do štěrbin a na základě ní se přesně nastaví orientace vtoků v přírubách a také poloha přírub. Vtoky mají vůči čelu přírub přesah, aby byly po složení reometru sevřeny a nemohlo tak dojít k jejich pootočení nebo pohybu ve směru toku kapaliny. Tento postup je shodný i pro magnetický obvod.

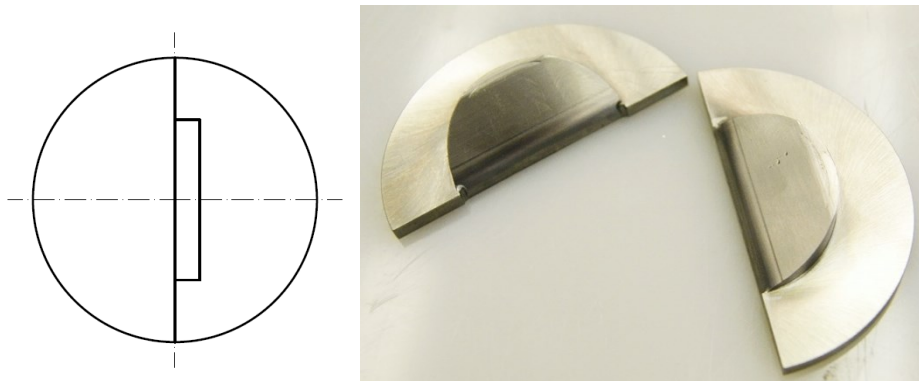


Obrázek 5-15 Skládání vyvinutého reometru pomocí spárové měrky

Pro štěrbinu v magnetickém obvodu i v nemagnetickém těle se zvolila koncepce asymetrie, protože je výhodnější – viz Obrázek 5-16 vlevo. Kvůli tomu byla potřeba i vtoky navrhnout jako asymetrické. Toto provedení má stejné výhody, jako asymetrická štěrbinu. Změnou pouze jednoho vtoku se přizpůsobí průřezu celé štěrbině. Při skládání reometru se bude muset pouze dbát zvýšené pozornosti na to, aby vyosený vtok byl na straně vyosené vložky.

Vtoky musí být z magneticky nevodivého materiálu, aby nezpůsobovaly magnetický zkrat při měření MR kapalin v aktivovaném stavu. Kvůli tomu by se snížila intenzita magnetického pole ve štěrbině. Jako vhodný materiál byla proto vybrána nerezová ocel 1.4301, jejíž magnetická nevodivost byla před výrobou ověřena.

Na základě konzultace ve firmě zajišťující výrobu vtoků byl zvolen vhodný technologický postup výroby, který zajistil variantu ideálního tvaru vtoků bez zářezů mimo oblast štěrbin spolu s hladkým povrchem rádiusů – viz Obrázek 5-16 vpravo.

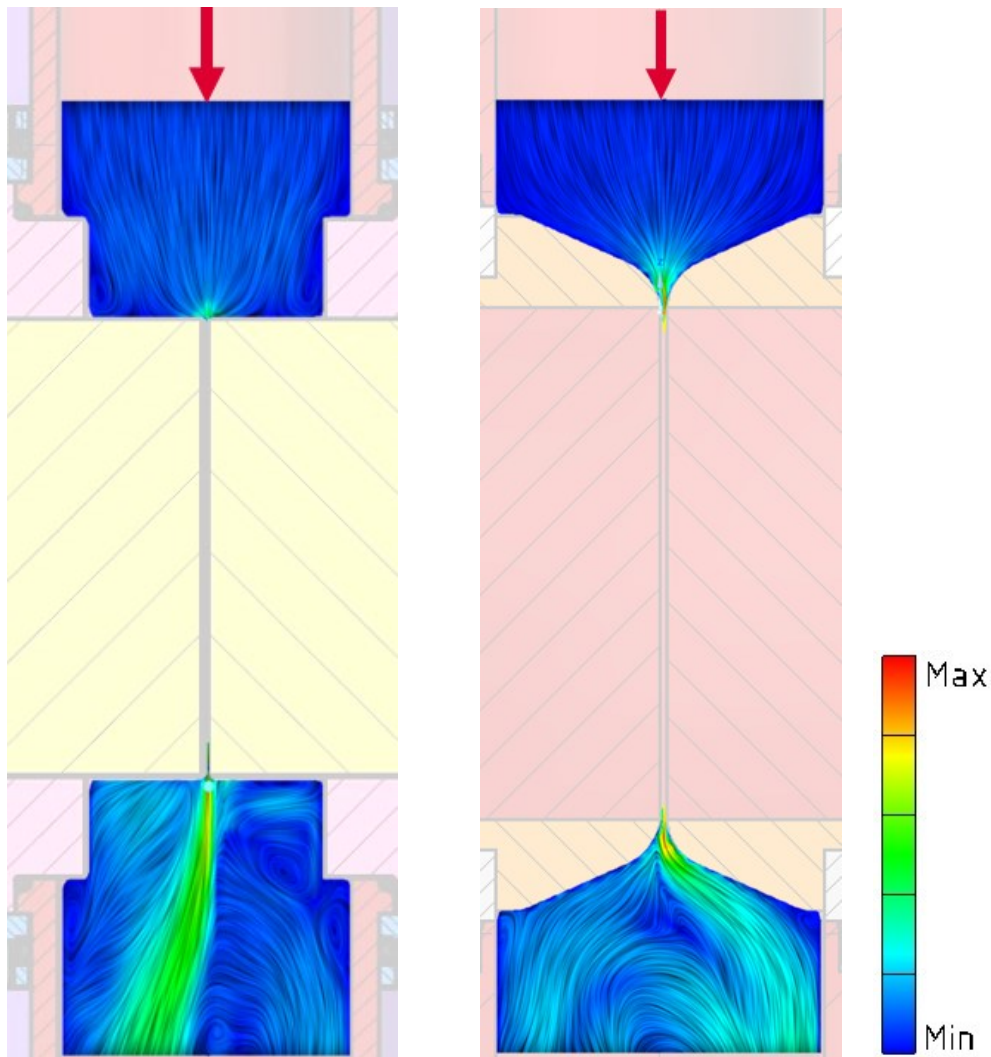


Obrázek 5-16 *Vlevo: asymetrie štěrbin, vpravo: vyrobené vtoky*

Při návrhu se vycházelo z výpočtů v jiné práci [13], v rámci které byly vtoky koncepčně navrženy. Nicméně bylo nutné upravit sklon šikmé plochy z hodnoty 8° na hodnotu 24° . Tato změna byla nutná kvůli tomu, aby plovoucí písty při dosednutí na opěrné plochy na vtočích nepřejížděly přes hranu mezi válcem a přírubou (viz Obrázek 5-14). Válec se nemohl posunout níž kvůli otvorům pro snímače. Změna byla ověřena pomocí CFD simulace v programu Ansys Discovery Life 2019 R2 a nemá negativní vliv na proudění.

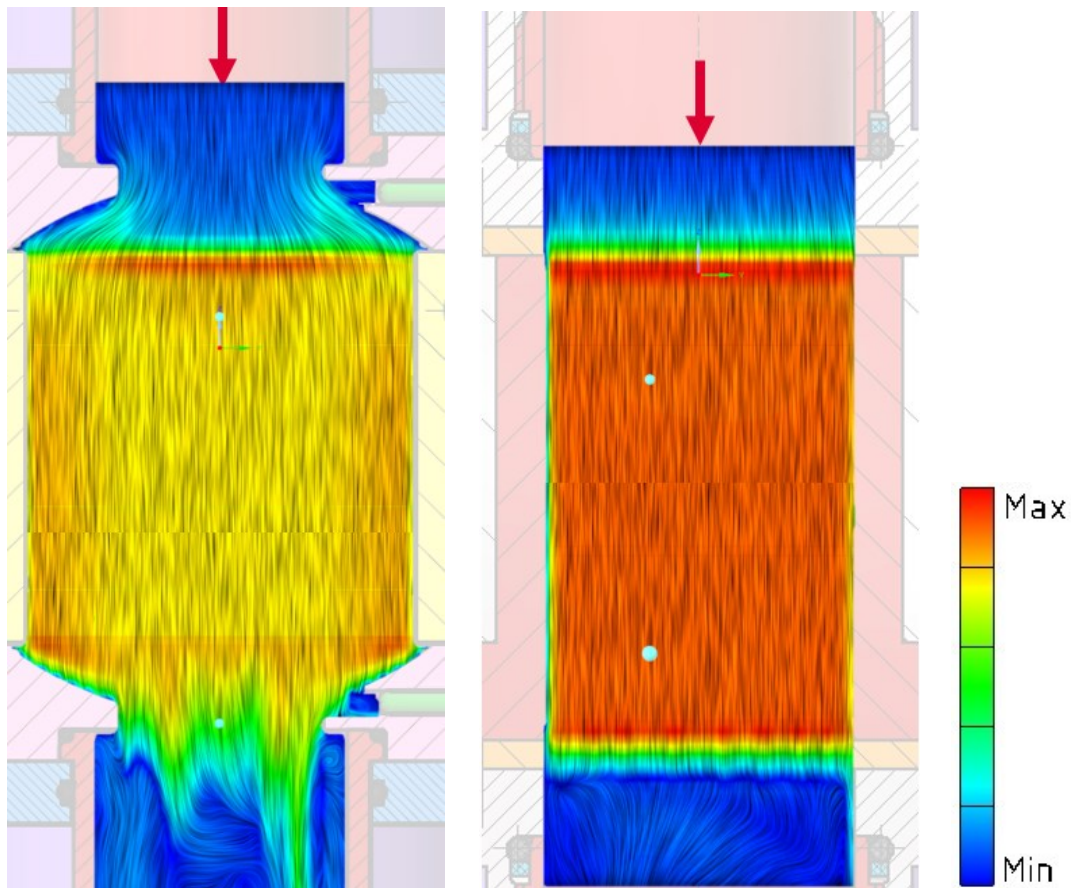
Simulace proběhla při proudění vody o teplotě 20°C s rychlostí pístu $0,2\text{ m/s}$. Pro porovnání vlivu vtoků byly tyto simulace provedeny i na původním slit-flow reometru. Barvy na obrázcích z CFD simulací reprezentují rychlost proudění kapaliny, přičemž modrá barva odpovídá nejnižší rychlosti a červená barva zase nejvyšší rychlosti.

Obrázek 5-17 znázorňuje příčný řez reometrem s viditelnou tloušťkou štěrbinou jak pro původní třetí evoluci reometru bez vtoků, tak pro nový vyvíjený reometr s vtoky. Je jasné patrné, že díky vtokům se prakticky odstraní víření kapaliny v oblasti před štěrbinou. To bude mít příznivý vliv na urychlení tvorby rychlostního profilu ve štěrbině, protože proud vstupující do štěrbinu nebude ovlivňován turbulencemi před ní. Díky tomu je navíc možné, že díky příznivým podmínkám se bude dosahovat laminárního proudění i u vyšších hodnot Reynoldsova čísla, než je 2300. Na výstupu ze štěrbinu je vidět, že proud kapaliny je při použití vtoků strháván na stranu a dochází zde k velmi silnému víření.



Obrázek 5-17 Rychlost proudění; vlevo: reometr třetí evoluce; vpravo: nový reometr s vtoky

Obrázek 5-18 znázorňuje také řez reometrem, ale tentokrát v podélném směru, kde je vidět šířka štěrbin. Na tomto obrázku je opět vlevo pohled na situaci ve třetí evoluci reometru bez vtoků, zatímco vpravo je znázorněno proudění ve vyvíjeném reometru s vtoky. U starého reometru byla štěrbina širší, než byl průměr válce, u nového reometru jsou oba rozměry stejné. Již v kapitole 3.2.2 byla diskutována oblast vena contracta, která vlivem víření zmenšuje průtočný průřez a přispívá tak ke zvýšení rychlosti proudění kapaliny ve vstupní oblasti do štěrbin. To zásadně zvyšuje velikost místních tlakových ztrát a také rychlost tvorby rychlostního profilu. Při porovnání této vstupní oblasti u starého reometru bez vtoků a u nového reometru s vtoky je patrný výrazný rozdíl.



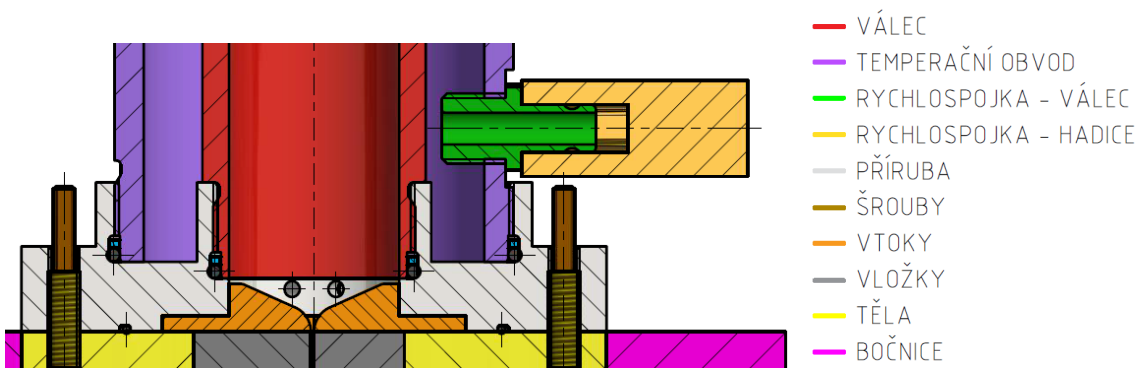
Obrázek 5-18 Rychlost proudění; vlevo: starý reometr, vpravo: nový reometr s vtoky

Je vidět, že díky použitým vtokům se prakticky podařilo odstranit lokální zvýšení rychlosti ve vstupní oblasti štěrbině. Díky tomu se naměřený tlakový spád více přiblíží ideálnímu tlakovému spádu způsobenému pouze viskózním třením kapaliny o stěny štěrbině, který je směrodatný pro určení vlastností kapaliny. Stejně tak je zajištěna konstantní rychlost proudění v celé štěrbině. Díky těmto simulacím byly ověřeny teoretické předpoklady vedoucí k minimalizaci vtokových ztrát do štěrbině. Minimalizace těchto ztrát byla hlavním cílem při návrhu vtoků.

5.3.3 Příklad, válec a temperační obvod reometru

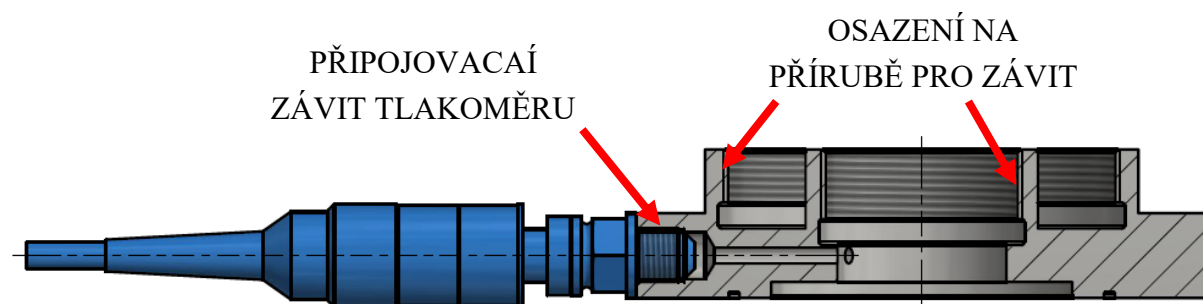
V následující kapitole bylo rozebráno hned několik konstrukčních uzlů, které spolu přímo souvisí. Jedná se o válec spolu s temperačním obvodem a přírubou, jejíž tvar tyto prvky ovlivňují.

Jak bylo uvedeno v koncepčních variantách, nejjednodušší přichycení válce a temperačního obvodu k přírubě je pomocí závitu v těchto součástech. Díky tomu se zredukuje množství součástí a rozložení s následným skládáním reometru při výměně vzorku kapaliny bude proto rychlejší a jednodušší. Po zvážení různých přístupů zohledňujících jak jednoduchost výroby, tak celkovou hmotnost reometru, bylo rozhodnuto použít variantu uchycení válce s opěrnou plochou v kombinaci s variantou tenké příruby u temperačního obvodu (viz Obrázek 5-19). I za cenu horší využitelnosti materiálu při výrobě přírub spočívá hlavní výhoda tohoto provedení v minimalizaci jejich hmotnosti.



Obrázek 5-19 Pohled na přírubu, válec a válec temperačního obvodu s rychlospojkami

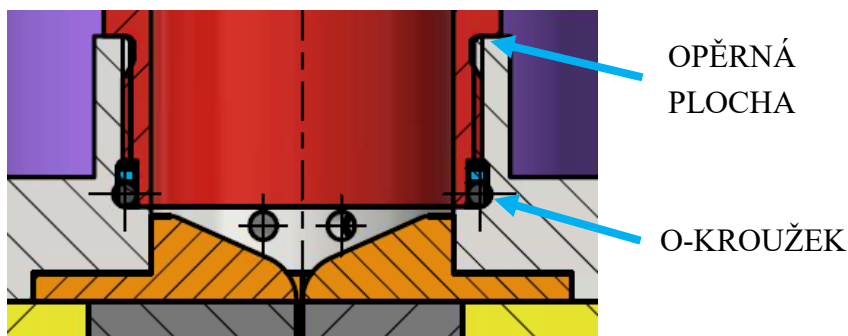
Oba tyto prvky vyžadují na přírubě osazení pro závit – viz Obrázek 5-20. Díky tomu můžou být příruby tak tenké, jak jim to dovolí připojovací závity snímačů, přičemž oba snímače mají téměř stejné rozměry tohoto závitu – v případě tlakoměrů M10 a v případě teploměru G 1/8. Nezbytné osazení na přírubě bylo v koncepční variantě popsáno jako nevýhoda především proto, že kvůli tomu bylo nutné polotovary více obrábět. Při kombinaci zvolené varianty uchycení válce s variantou uchycení temperačního obvodu bude ale možné z delšího polotovaru zhotovit potřebná geometrie. Při návrhu bylo nezbytné respektovat rozměry soustružnického nože, aby se do vzniklého mezikruží během výroby bez kolizí vlezl.



Obrázek 5-20 Pohled na přírubu s tlakoměrem

Příruby musí být vyrobeny z magneticky nevodivého materiálu, aby během měření MR kapalin v aktivovaném stavu nedocházelo k magnetickému zkratu. Z tohoto důvodu byl pro výrobu přírub zvolen stejný materiál, jako pro výrobu vtoků – nerezová ocel 1.4301. Jeho magnetické vlastnosti byly ověřeny před výrobou. Pro zjednodušení montáže reometru má v sobě jedna příruba přímo díry se závitem pro šrouby držící reometr pohromadě. Tyto šrouby zároveň budou zabraňovat rotaci reometru v držáku – podrobněji viz kapitola 5.4.1.

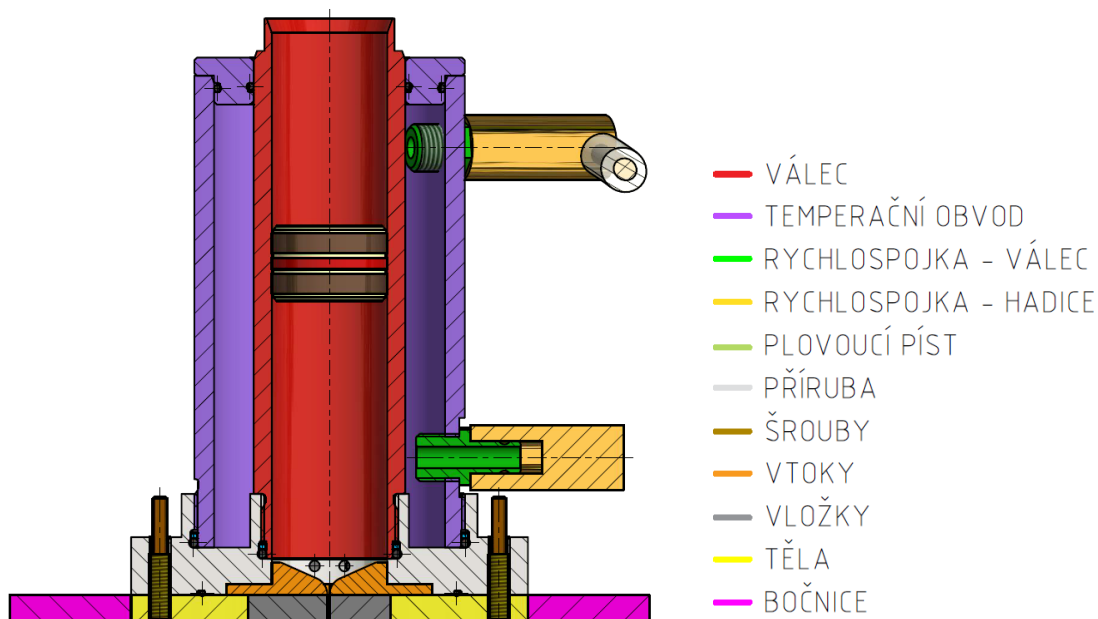
Varianta válce s opěrnou plochou zajistí jeho přesné ustavení vůči přírubě – viz Obrázek 5-21. Svislý směr jeho osy může ale ještě ovlivnit plocha, kterou příruba dosedá na nemagnetický nebo magnetický obvod. Tato plocha musí být s opěrnou plochou válce rovnoběžná. Stejně tak musí být plochy pro příruby na nemagnetickém těle nebo magnetickém obvodu rovnoběžné.



Obrázek 5-21 Válec s opěrnou plochou

K těsnění mezi přírubou a oběma válci je vhodné použít o-kroužek spolu s opěrným kroužkem, aby se o-kroužek nemohl poškodit o začínající závit. Tato varianta umožňuje umístit o-kroužek před závit – viz Obrázek 5-21. Pro umístění o-kroužku byla použita drážka výběhu závitu.

Varianta uchycení válce splňuje stanovenou podmínku na zajištění svislé polohy jeho osy a stejně tak utěsnění je bezproblémové. Válec je navíc dostatečně exponovaný, aby byl temperační obvod dobře účinný – viz Obrázek 5-22. Dalším velkým plusem je, že díky této variantě odpadá nutnost řešit kolize válců s otvory pro snímače a také možnost použít těsnění válce před závitem.

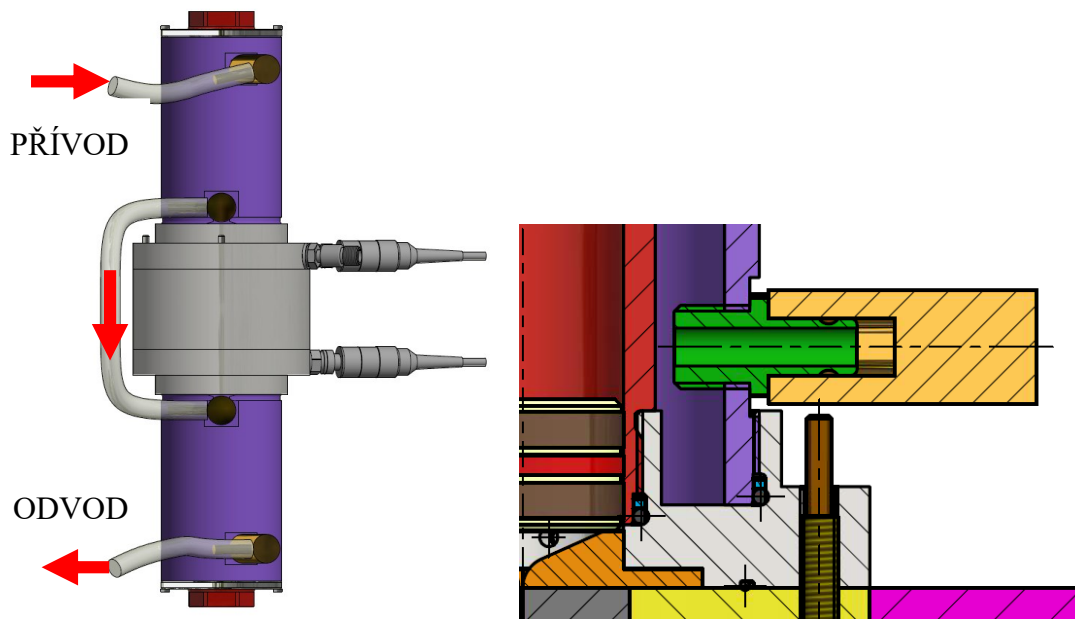


Obrázek 5-22 Horní část reometru v řezu

Válec byl vyroben z polotovaru hydraulické trubky určené pro výrobu hydraulických válců. Díky tomu má jeho vnitřní válcová plocha ideální drsnost a geometrickou i rozměrovou přesnost, což zjednodušilo jeho výrobu. Byl navržen tak, aby se obráběl co nejméně, protože zbytková pnutí v materiálu po obrobení by mohla narušit válcovitost vnitřního průměru.

Úkolem válce temperačního okruhu je udržet v sobě vodu, aby mohla ovlivňovat teplotu měřeného vzorku kapaliny. Během měření bude namáhán pouze přtlakem vody a žádné vnější vlivy na něj působit nebudou. Díky tomu jej bylo možné vyrobit z duralu, čímž se ušetřila hmotnost reometru. Materiál byl vybrán s ohledem na dobrou obrobiteľnosť – AW 2007.

Obrázek 5-23 znázorňuje vlevo schématické vedení vody temperačním okruhem. Je vidět, že horní i spodní temperační válce jsou spojeny hadicí a celý temperační obvod tak má jeden přívod a jeden odvod. Poloha otvorů pro přívod a odvod vody byla navržena tak, aby při dosednutém pístu na vtcích byl otvor co nejbližší jeho čelu, stejně je situován otvor i v druhé krajní poloze pístu na druhé straně válce. Díky tomu bude zajištěn průtok vody po celé délce válce pro různé objemy měřené kapaliny.



Obrázek 5-23 Vlevo: schéma přívodu a odvodu vody do temperačního obvodu reometru; vpravo: připojení rychlospojky

Válce temperačního obvodu mají na svém povrchu vroubkování pro pohodlnější ruční obsluhu. V každém válci jsou celkem dva otvory, jeden pro přívod a jeden pro odvod vody. V každém otvoru je spojovací prvek pro připojení hadice.

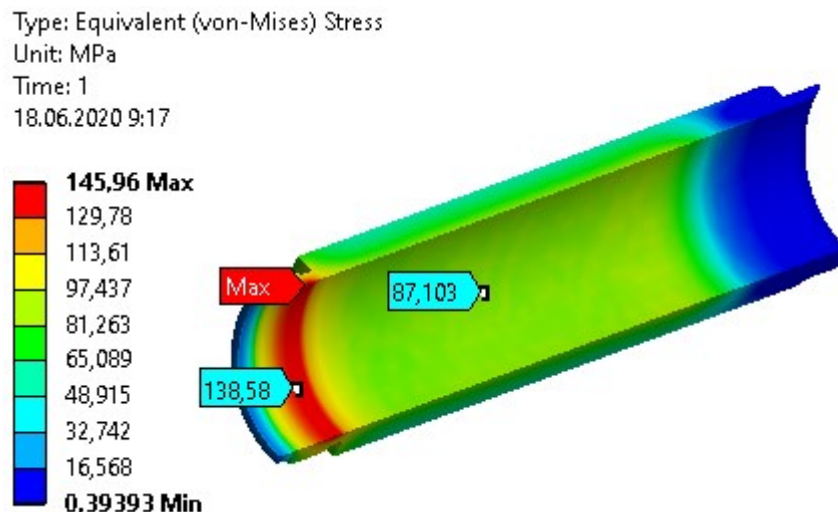
Je vidět, že v obou temperačních válcích jsou rychlospojky vůči sobě pootočené. To je způsobeno šroubem, který upevňuje rám pohonu reometru k siloměru – podrobněji viz kapitola 5.4.2. Vychýlení je na obou válcích, aby byly záměnné.

Hadice se budou k temperačnímu obvodu připojovat pomocí tzv. rychlospojek od německého výrobce LÜDECKE GmbH, které je možné obsluhovat i jednou rukou. Tyto rychlospojky jsou vybaveny zpětnými ventily, aby po rozpojení voda nevytekla. Rozpojení bude nutné před vyjmutím reometru z držáku po provedeném měření. Díky zpětným ventilům tak nedojde k úniku vody ani z hadic, ani z temperačních válců. Po vyjmutí reometru z držáku pak bude možné kdekoliv podle potřeby vodu vypustit. K utěsnění rychlospojek upevněných v temperačním obvodu byla uvažována teflonová páska v závitě.

Ve válcičkách temperačního obvodu jsou rychlospojky na přívodu a odvodu vody od sebe vzdáleny co nejdál a zároveň jsou umístěny co nejbliž krajům temperačních válců. Díky tomu bude voda proudit kolem co největší délky válce a tím se zefektivní odvod nebo přívod tepla. Pro rychlospojky zašroubované ve válci temperačního obvodu bude na povrchu válce zarovnaná plocha pro dosednutí a ještě bude použita teflonová páska na závitě pro utěsnění.

Strukturální analýza válce

Maximální tlak ve válci může být až 200 bar, proto byla provedena simulace znázorňující napětí ve válci při tomto tlaku – viz Obrázek 5-24. V modelu byla zavedena čtvrtinová symetrie pro zrychlení výpočtu. Tlak se aplikoval na vnitřní válcovou plochu a ještě do místa u čela válce, kde bude těsnit o-kroužek. Největší napětí se objevilo v místě drážky závitě, kde dosahuje hodnoty téměř 150 MPa. Výpočet měl velmi dobrou konvergenci – viz Obrázek 5-25.



Obrázek 5-24 Napětí ve válci při tlaku 200 bar

	Equivalent Stress (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	148,48		34834	11186
2	145,96	-1,7104	48354	27625

Obrázek 5-25 Konvergence výpočtu napětí

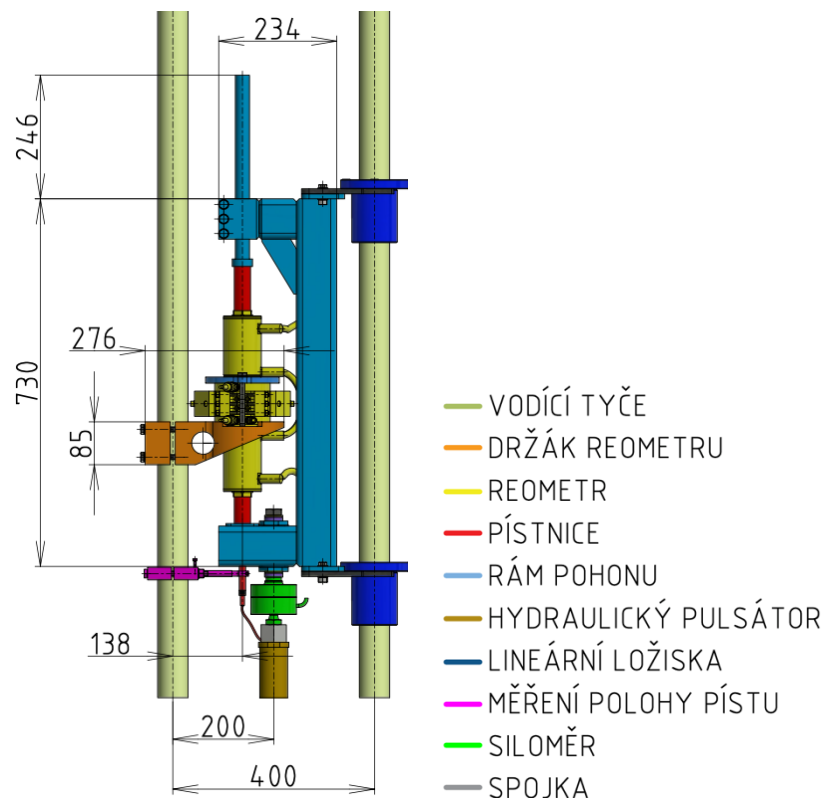
Výpočet bezpečnosti válce vůči meznímu stavu únavy byl založen pouze na napětí, které vzniklo vlivem přetlaku. Válec se totiž bude k reometru dotahovat pouze rukou, takže vzniklé předepnutí nebude významné. Výpočet byl proveden v rovnici (5-6). Výpočet korigované meze únavy σ'_{co} byl proveden v příloze 12.2.

$$k_{cu} = \frac{\sigma'_{co}}{146 \text{ MPa}} = \frac{228 \text{ MPa}}{146 \text{ MPa}} = 1,56 \quad (5-4)$$

kde k_{cu} je bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavy materiálu a σ'_{co} je korigovaná mez únavy materiálu v MPa.

5.4 Držák reometru a rám pohonu

Držák reometru zajišťuje jeho polohu a rám pohonu přenáší sílu z lineárního aktuátoru na plovoucí písty. Obě části byly navrhovány na rámovou konstrukci, která je součástí hydraulického pulsátoru Inova ve školní laboratoři – viz Obrázek 5-26. Jedná se pouze o vodící tyče spojené ráhnem, mezi kterými je umístěn hydraulický pulsátor. Tento pulsátor bude sloužit jako hnací jednotka celého zařízení. Navrhnuté řešení se proto muselo přizpůsobit rozměrům této rámové konstrukce. Při návrhu se uvažoval i plánovaný další vývojový krok slit-flow reometru, a to vytvoření standalone zařízení. Navrhnutý pohon by se tak měl dat jednoduše převzít a použít v jiné konstrukci.



Obrázek 5-26 Konstrukční uzly celého návrhu

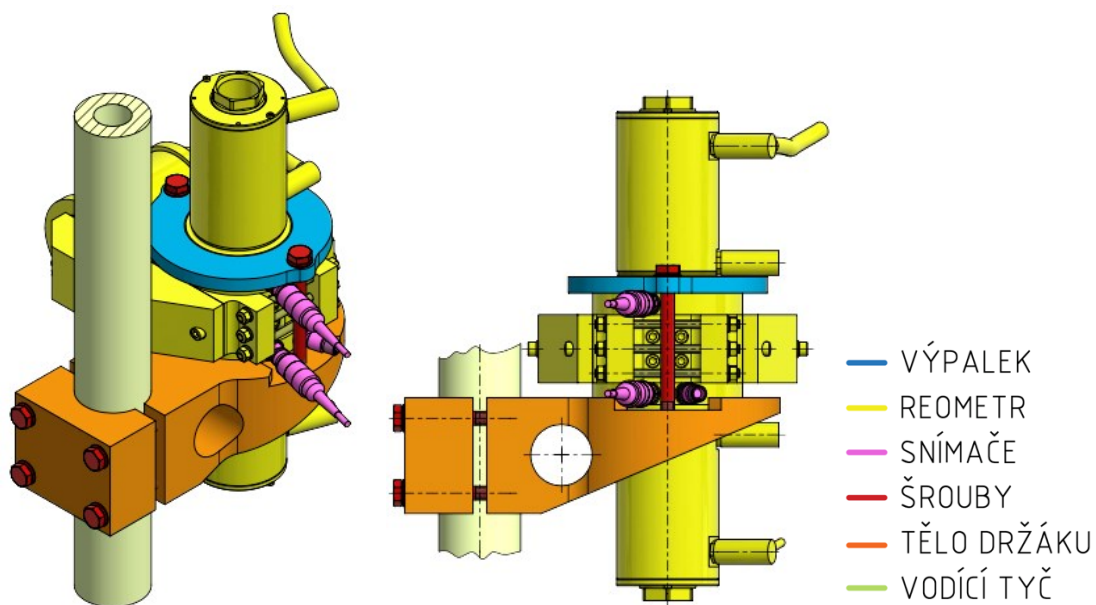
Především díky malým rozměrům držáku se zvolila a dále rozpracovala jeho varianta uchycení na jedné vodící tyči. S tím souvisela geometrie rámu pohonu, jehož ideální tvar pro takto provedený držák je ve tvaru písmene C. Díky vychýlení reometru k jedné z vodících tyčí bylo možné řešit měření polohy plovoucího pístu pomocí snímače vedeného skrz dutou pístnici – viz kapitola 4.4. To je jeho nejjednodušší provedení, které nekomplikuje další součásti rámu pohonu.

Stejně jako u reometru, i zde byla snaha zachovat na celém pohonu reometru stejnou velikost závitu a typ šroubů. V kapitole 5.1 bylo určeno maximální provozní zatížení 15 kN. S tímto zatížením proto byly návrhy ověřeny strukturální analýzou v programu ANSYS Workbench 19.2. Analýzy proběhly pro oba směry protlačení. Jednotlivým prvkům konstrukce byly věnovány následující podkapitoly.

5.4.1 Držák reometru

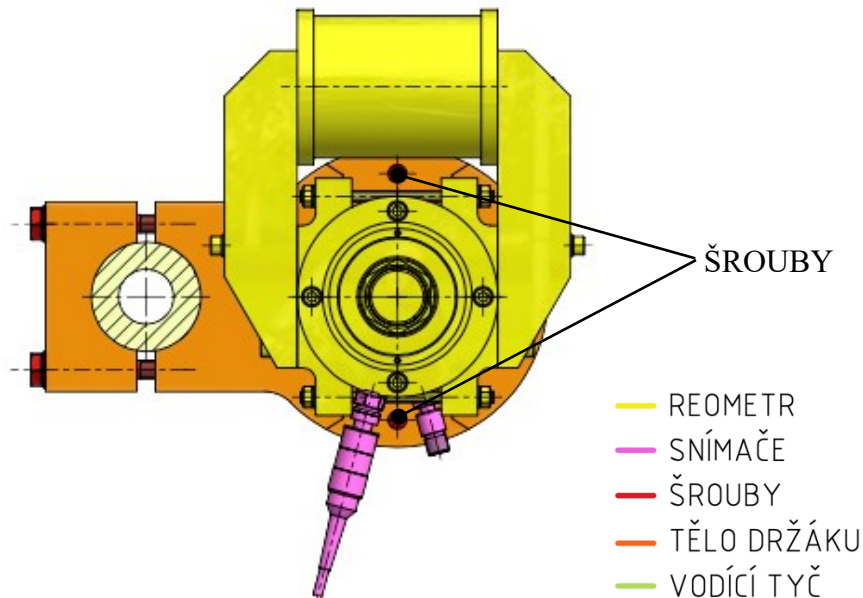
Díky malým rozměrům byla vybrána a v kapitole 4.3.1 dále rozpracována varianta držáku upevněného na jedné vodící tyči. Z uvedených variant řešení se jako nejvhodnější jevila varianta třetí, která proto byla dále rozpracována v konstrukční části. Tato varianta umožňuje relativně jednoduchou a rychlou výrobu při splnění všech kritérií.

Hlavní část držáku, jeho tělo, je vyrobeno z jednoho kusu materiálu – viz Obrázek 5-27. Pro největší úběry materiálu se využila technologie elektroerozivního obrábění, kterou se vyřezala jeho geometrie s potřebnými přídávky pro následné přesné dokončení na frézce. Díky tomu se zlepšila využitelnost materiálu. Součástí těla je i svěrný spoj s vodící tyčí. Pro upevnění reometru slouží výpalek, který se na něj nasadí a k tělu držáku se jednoduše připevní pomocí dvou šroubů.



Obrázek 5-27 Držák reometru

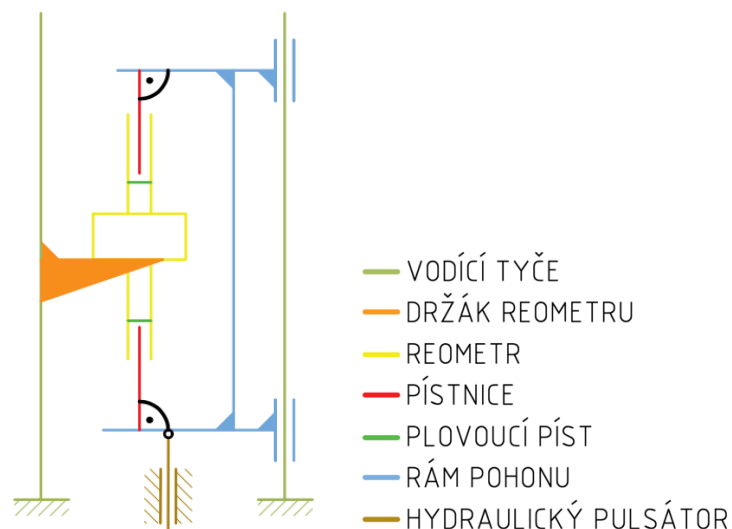
Umístění šroubů držících výpalek bylo zvoleno s ohledem na další součásti reometru, aby nedošlo ke kolizi. Obrázek 5-28 poskytuje pohled na prostorové řešení těchto šroubů. Je vidět, že na jedné straně držáku je šroub umístěn mezi cívkou a tělem reometru, na druhé straně je zase šroub mezi dvěma snímači.



Obrázek 5-28 Umístění šroubů výpalku

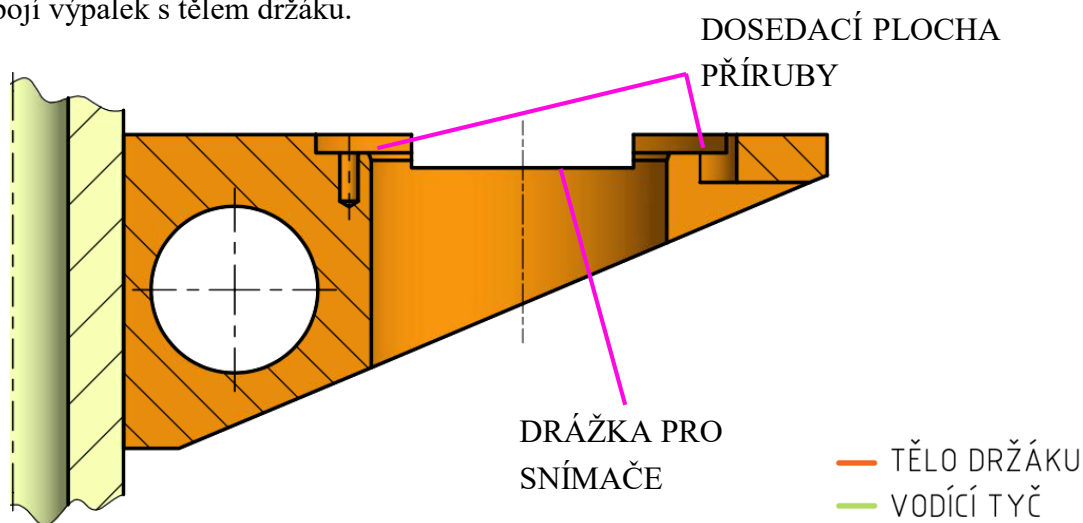
Díky takto jednoduchému spojení reometru s držákem bude možné tohle řešení použít i pro různé délky štěrbin – jednoduše se použije vhodná délka šroubů. Zároveň toto řešení zajistí, že reometr bude uložen bez vůle. Výpalek dosedá přímo na přírubu reometru, proto musí být hlavy šroubů držících reometr pohromadě zapuštěné. Takto uložený reometr v držáku je během měření vždy pouze stlačován. Šrouby, které ho drží pohromadě, nejsou během měření namáhány.

Jedním z hlavních kritérií na držák bylo zajistit přesné uložení reometru, aby jeho osa měla svislý směr. Navíc ještě musí být dostatečně tuhý. Obě tyto podmínky zajistí, že se ani při provozu vlivem pružení významně nenaruší kolmost mezi osami pístnic a dosedacími plochami rámu pohonu – viz Obrázek 5-29. Podrobněji byla tato geometrická závislost rozebrána v kapitole 5.2. Vodící tyč, na které je držák upevněn, slouží jako reference svislého směru. Kvůli tomu musí být dosedací plocha pro přírubu reometru kolmá na osu svěrného pouzdra v těle držáku. Po vložení reometru do držáku je díky přesné dosedací ploše a díky přesné konstrukci reometru zajištěn svislý směr jeho osy – viz Obrázek 5-30.



Obrázek 5-29 Kinematické schéma pohonu reometru

Snímače umístěné v přírubách mají větší rozměry, než je tloušťka přírub. To by způsobilo kolizi s tělem držáku po vložení reometru. Kvůli tomu musí být v těle držáku drážka, která tuto kolizi vyřeší. Tato drážka byla provedena symetricky na obou stranách těla držáku, aby bylo možné reometr vkládat snímači jak směrem dopředu, tak i směrem dozadu. Neuvažuje se směr do boků především kvůli magnetickému obvodu, kdy by cívka kolidovala s ostatními prvky konstrukce. Tomuto záměru odpovídá také symetrické uložení šroubů, pomocí kterých se spojí výpalek s tělem držáku.

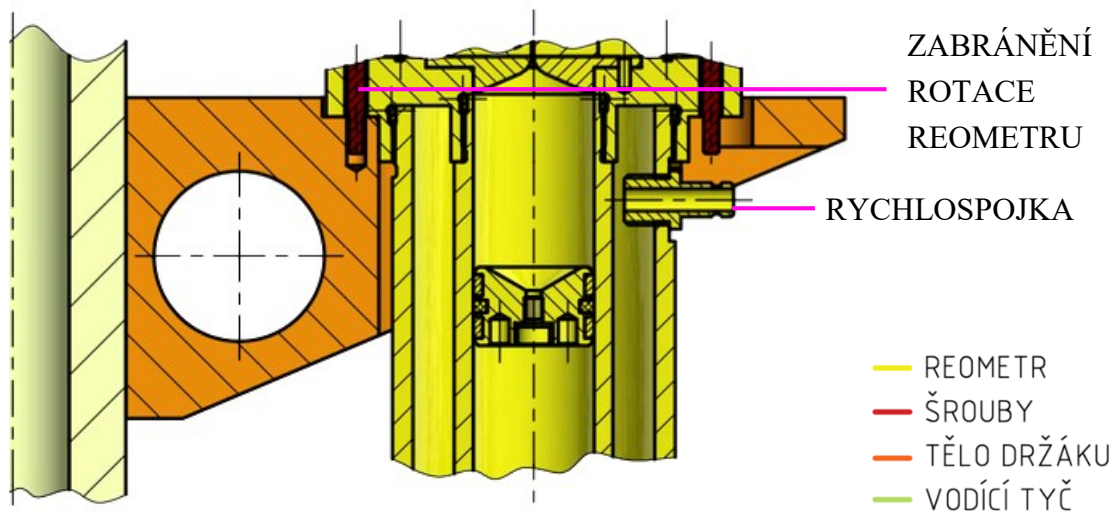


Obrázek 5-30 Nahoře: držák, dole: reometr v držáku

Po vložení reometru do držáku (viz Obrázek 5-31) je vidět několik dalších prvků, které měly vliv na geometrii těla držáku. Prvním prvkem je rychlospojka našroubovaná do temperačního válce. Kvůli ní musí být na jedné straně těla držáku drážka, aby během vkládání nebo vyjímání reometru s držákem nekolidovala. Vzhledem ke geometrii těla držáku byla drážka umístěna v místě, kde vyžaduje nejmenší úběry materiálu. V tomto místě zároveň poskytuje nejvhodnější obsluhu.

Dalším prvkem jsou šrouby, které brání pootočení reometru kolem jeho osy. K jeho rotaci při měření by mohlo dojít například kvůli vibracím. Je důležité zabránit rotaci reometru zejména kvůli snímačům vyčnívajícím na jedné straně (viz Obrázek 5-28). Díky tomu se zabrání jejich kolizi s ostatními prvky konstrukce. Nemá smysl spoléhat pouze na tření mezi přírubou reometru a tělem držáku, protože tvarově zajištěná poloha reometru je mnohem spolehlivější.

Tyto šrouby drží reometr pohromadě a není proto nutné do konstrukce přidávat další součásti. Jejich délka byla záměrně zvolena delší, aby vůči přírubě reometru přečnívaly. Na přečnívajících koncích šroubů byla osoustružena osazení, která z nich odstranila závit a díky tomu vznikla válcová plocha. Tyto válcové plochy jsou uloženy v dírách v držáku a budou tak jistit polohu reometru tvarovým stykem. Toto řešení je velmi jednoduché a nepotřebuje žádné další prvky. Díky osazení se odstraní část závitu, takže to nijak neprodlouží skládání a rozebírání reometru.



Obrázek 5-31 Reometr v držáku

Reometr drží pohromadě celkem čtyři šrouby. Jak je vidět (viz Obrázek 5-31), šroub v místě drážky pro rychlospojku vyčnívá volně do prostoru. To ale ničemu nevádí, protože zbylé tři šrouby jsou v dírách a pro zajištění polohy reometru je to naprosto dostatečné.

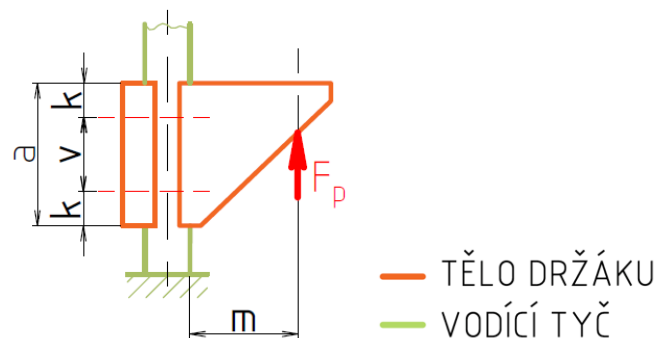
V další části téhle kapitoly byly uvedeny analytické výpočty, které se týkají především spojovacích šroubů a následovat budou strukturální analýzy těla držáku.

Výpočty

Tělo držáku i výpalek pro přichycení reometru vznikaly na základě strukturální analýzy. Pouze šrouby se ověřovaly analyticky. Jedná se přitom jak o šrouby svěrného spoje, tak i o šrouby, kterými se reometru přitáhne pomocí výpalku k tělu držáku.

Šrouby svěrného spoje těla držáku

Tyto šrouby jsou během měření namáhány jak silou předpětí, tak ještě osovou silou, která vznikne vlivem zachycení ohybového momentu. Potřebná síla předpětí šroubů svěrného spoje byla vypočítána pomocí aplikace v programu Autodesk Inventor Professional 2019 – viz příloha 12.3.1. Na základě tohoto výpočtu musí být šrouby předepnuty silou alespoň $F_i = 15,9$ kN, tomu odpovídá utahovací moment $M_u = 41$ Nm (viz rovnice (12-36)). Přírůstek osové síly šroubů vlivem zachycení ohybového momentu F_{sx} je přibližně 11 kN. Na základě výpočtu byly určeny šrouby M10 nejvyšší pevnostní třídy 12.9. Šrouby M10 budou použity pro celý pohon reometru, aby k montáži nebo demontáži byl potřeba pouze jeden nástroj.

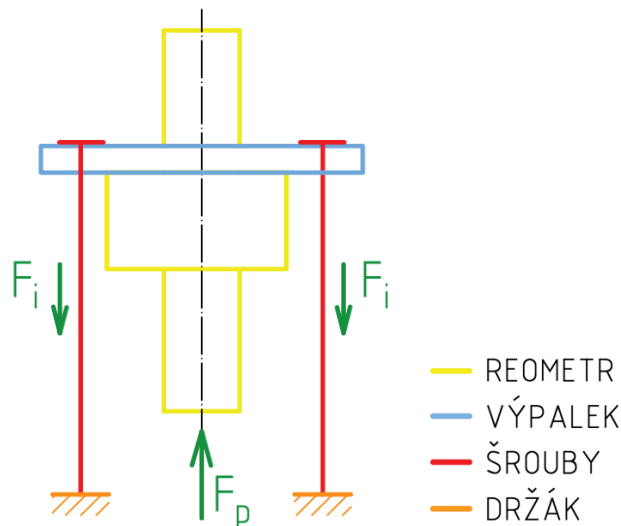


Obrázek 5-32 Schématické zobrazení držáku při protlačení směrem nahoru

Šrouby svěrného spoje mají bezpečnost k meznímu stavu pružnosti během utahování $k_{msp} = 1,39$ (viz rovnice (12-40)) a během provozu $k_{msp} = 2,3$ (viz rovnice (12-42)). Aby nedošlo k překročení dovoleného tlaku v závitech, musí být hloubka zašroubování alespoň 9 mm (viz rovnice (12-42)). Výpočet proběhl v příloze 12.3.1.

Šrouby výpalku

Na držáku reometru byly použity ještě další dva šrouby, které zajišťují uložení reometru. Tyto dva šrouby se k držáku přitáhnou přes výpalek nasazený na reometru – viz Obrázek 5-33. Oba šrouby jsou nejvíce namáhány při protlačování kapaliny směrem nahoru. V tomto okamžiku na ně totiž působí jak síla předpětí, tak ještě síla od lineárního aktuátoru.



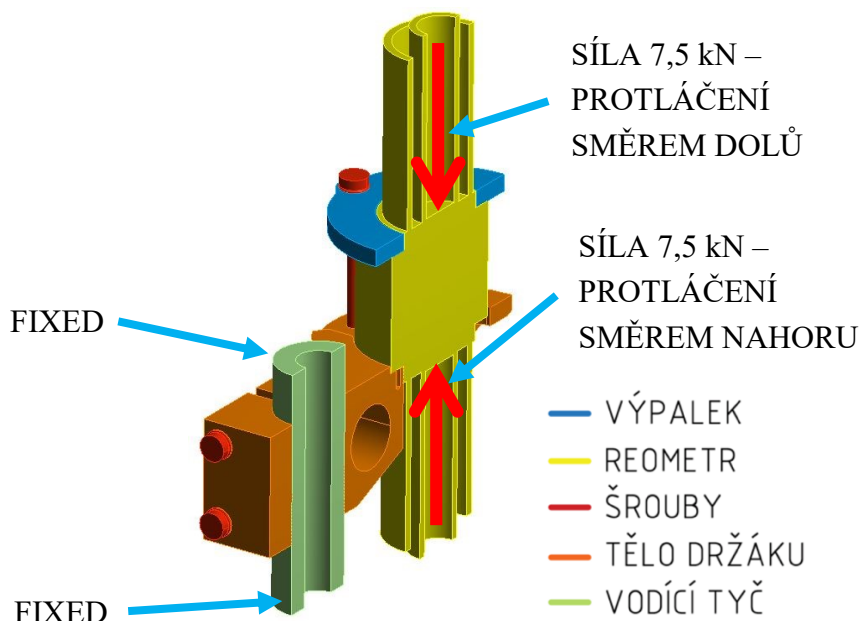
Obrázek 5-33 Schematicky znázorněné upevnění reometru v držáku pomocí výpalku a šroubů

Celý výpočet těchto šroubů byl proveden v příloze 12.3.2. Při zvolené hodnotě předpětí šroubu $F_i = 9 \text{ kN}$ a při síle lineárního aktuátoru $F_p = 15 \text{ kN}$ je jeden šroub je namáhán maximální silou $F_s = 16,5 \text{ kN}$. Jak již bylo zmíněno, na celém pohonu byl dodržen stejný rozměr závitu. Proto proběhla pouze kontrola závitu M10, který byl spočítán pro svěrné pouzdro držáku. Tyto šrouby jsou namáhány výrazně méně, než šrouby ve svěrném spoji. Jejich bezpečnost k meznímu stavu pružnosti je během utahování $k_{msp} = 2,47$ (viz rovnice (12-51)) a během provozu je $k_{msp} = 3,79$ (viz rovnice (12-46)). Minimální hloubka zašroubování před překročením dovoleného tlaku v závitech je podle rovnice (12-53) 6 mm.

Strukturální analýza držáku

Aby držák reometru dobře plnil svou funkci, musí splňovat již zmíněná kritéria. Z těchto kritérií je nejdůležitější dostatečná tuhost. Ta totiž během protlačení kapaliny ovlivňuje kolmost mezi osou reometru a dosedací plochou na rámu pohonu reometru (viz Obrázek 5-1)). Pro návrh proto byla odhadem stanovena hranice maximální odchylky horního čela válce reometru na hodnotu 0,3 mm při plném zatížení 15 kN.

Celkový pohled na model použitý ve strukturální analýze poskytuje Obrázek 5-34. Kvůli zavedené symetrii, která zrychlí výpočet, je velikost zatížení v simulaci poloviční vzhledem k maximálnímu provoznímu zatížení 15 kN. Simulace proběhla pro oba směry zatěžování.



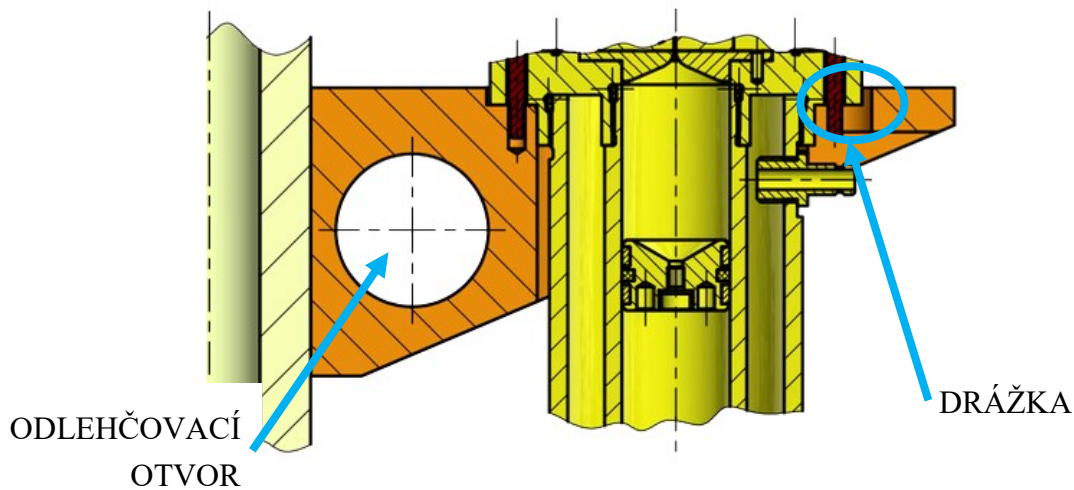
Obrázek 5-34 Model použitý pro strukturální analýzu

V simulaci byl použit zjednodušený reometr, který kopíruje vnější rozměry toho skutečného, ale neobsahuje vnitřní prvky jeho konstrukce (např. vtoky, vložky apod.), což zjednodušilo a zrychlilo výpočet. Zatížení od lineárního aktuátoru se aplikovalo na tento zjednodušený reometr, přes který působilo na tělo držáku a díky tomu zatěžování v simulaci odpovídalo realitě.

Součástí modelu je i část vodící tyče, aby bylo možné nastavit reálné chování kontaktu držáku reometru s vodící tyčí. Dále byly v simulaci samozřejmě i další prvky konstrukce, jako výpalek a všechny šrouby.

Vodící tyč byla na obou čelech zavazbena vazbou fixed. Kontakty v místě zašroubování šroubů do těla držáku byly nastaveny jako bonded. Ostatní kontakty byly nastaveny jako třecí – frictional, se součinitel tření 0,15. Šrouby byly předepnuty na hodnotu předpětí odpovídající analytickým výpočtům. Typ sítě na držáku byl hex dominant, protože je vhodnější pro součásti namáhané ohybem. Celkem bylo v simulaci na jejím počátku 111 602 nodů, tato hodnota ale kvůli nastavené konvergenci vzrostla.

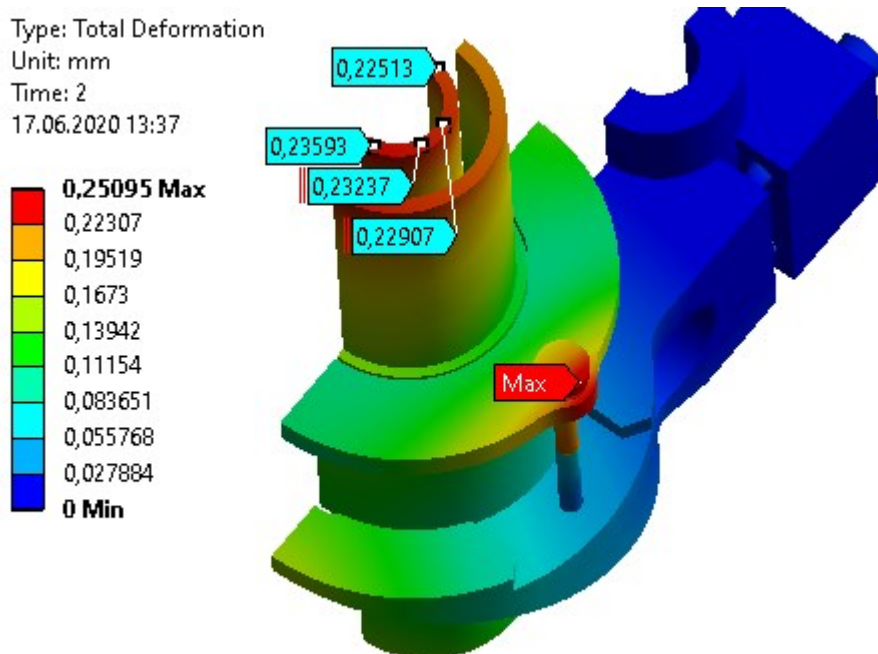
Na základě simulací se upravoval průměr a poloha odlehčovacího otvoru v těle držáku, aby moc neovlivňoval jeho tuhost – viz Obrázek 5-35. Jako problematické místo se projevila drážka v těle držáku, která je nutná pro průchod rychlospojky na temperačním válci. V této drážce se objevovalo vysoké napětí. Proto bylo potřeba zvětšit rádius koncové části držáku tak, aby se toto nebezpečné místo odstranilo.



Obrázek 5-35 Hlavní místa k úpravám na základě výsledků simulací

Protlačování směrem dolů

Při protlačování kapaliny směrem dolů byl pro vyhodnocení analýzy rozhodující posun čela horního válce. Rám pohonu reometru totiž přenáší zatížení na plovoucí píst přes horní pístnici. Kvůli tomu byla v simulaci nastavena podmínka konvergence pro deformaci držáku. Jak je vidět z výsledků (viz Obrázek 5-36), celkový posun čela válce se pohybuje pod hodnotou 0,3 mm. Maximální deformace se vyskytla mimo čelo válce na výpalku přidržující reometr v držáku. Celý výpočet měl velmi dobrou konvergenci (viz Obrázek 5-37), která byla nastavená pouze na tělo držáku.



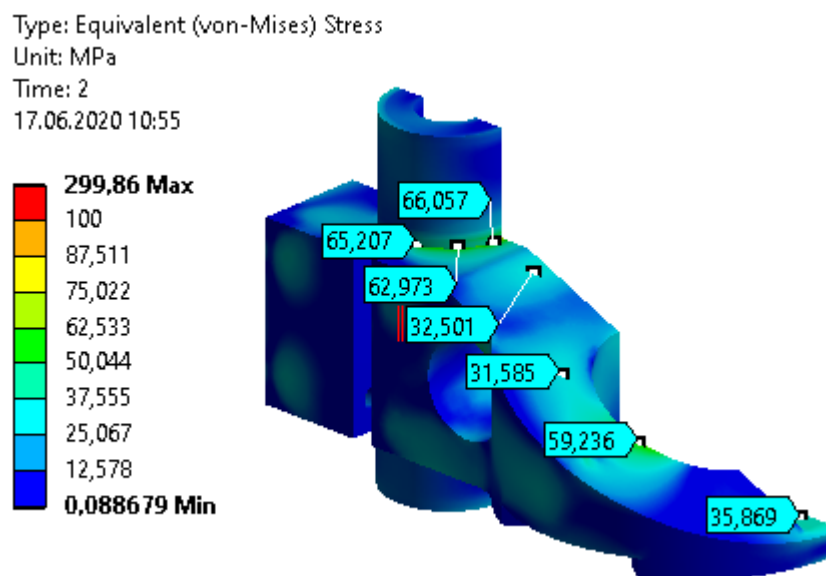
Obrázek 5-36 Protlačování směrem dolů - posun

	Total Deformation 2 (mm)	Change (%)	Nodes	Elements
1	0,23869		111602	34331
2	0,2366	-0,87945	125222	66762

Obrázek 5-37 Konvergence výpočtu

Kromě deformace se samozřejmě vyhodnocovalo i napětí v těle držáku. V obrázcích znázorňujících toto napětí je kvůli lepší přehlednosti zobrazeno pouze tělo držáku s vodící tyčí, výpočet ale proběhl na celém modelu tak, jak jej znázorňuje Obrázek 5-34.

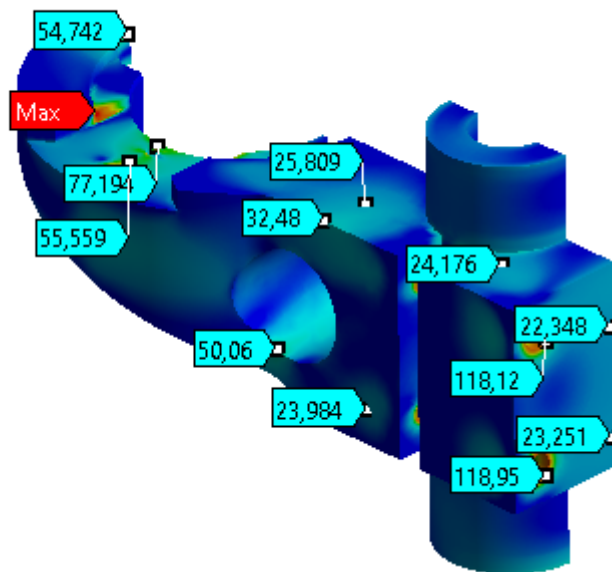
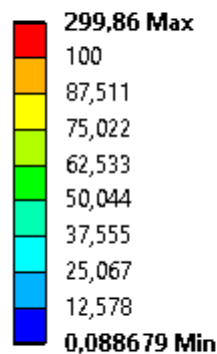
V celém těle držáku jsou napětí velmi nízká. Obrázek 5-38 poskytuje pohled na napětí ve spodní části držáku. V kontaktu s vodící tyčí jsou na hraně napětí o velikosti přibližně 70 MPa. Další významné místo ve spodní části těla držáku se nachází v místě otvoru pro reometr, ve kterém dosahuje napětí velikosti přibližně 60 MPa.



Obrázek 5-38 Protlačování směrem dolů, pohled na napětí ve spodní části držáku

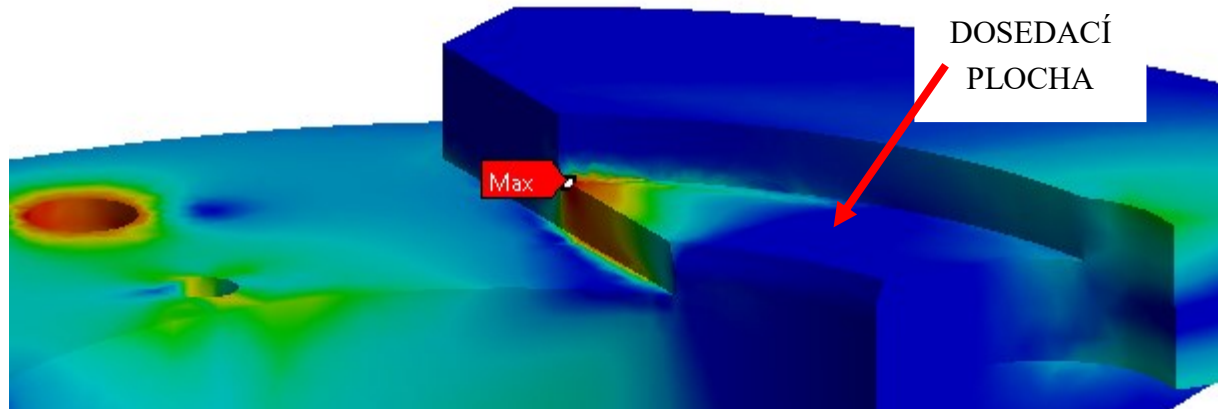
Obrázek 5-39 poskytuje pohled na napětí v horní části držáku. Vyskytuje se zde i maximální hodnota z celé simulace. Další významné místo se nachází na hranách otvorů pro šrouby svěrného pouzdra. Vlivem předpětí těchto šroubů se zde velikost napětí pohybuje přibližně kolem hodnoty 120 MPa. To je druhá největší hodnota z celého těla držáku. V ostatních částech těla držáku jsou napětí výrazně nižší.

Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 2
 17.06.2020 11:01



Obrázek 5-39 Protlačování směrem dolů, pohled na napětí v horní části držáku

Maximální hodnota napětí se nachází na hraně dosedací plochy pro přírubu, kde už začíná drážka pro snímače reometru – viz Obrázek 5-40. Reometr dosedá na celou dosedací plochu, proto takové lokální maximum v tomto místě ve skutečnosti nemůže vzniknout a tak vysoká hodnota je pravděpodobně způsobena kontaktem hrany s reometrem.



Obrázek 5-40 Maximální hodnota napětí na těle držáku

Výpočet napětí v těle držáku při protlačení kapaliny směrem dolů měl dobrou konvergenci – viz Obrázek 5-41.

	Equivalent Stress (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	192,25		111602	34331
2	284,02	38,54	105195	48662
3	299,86	5,4237	278791	163688

Obrázek 5-41 Konvergence výpočtu

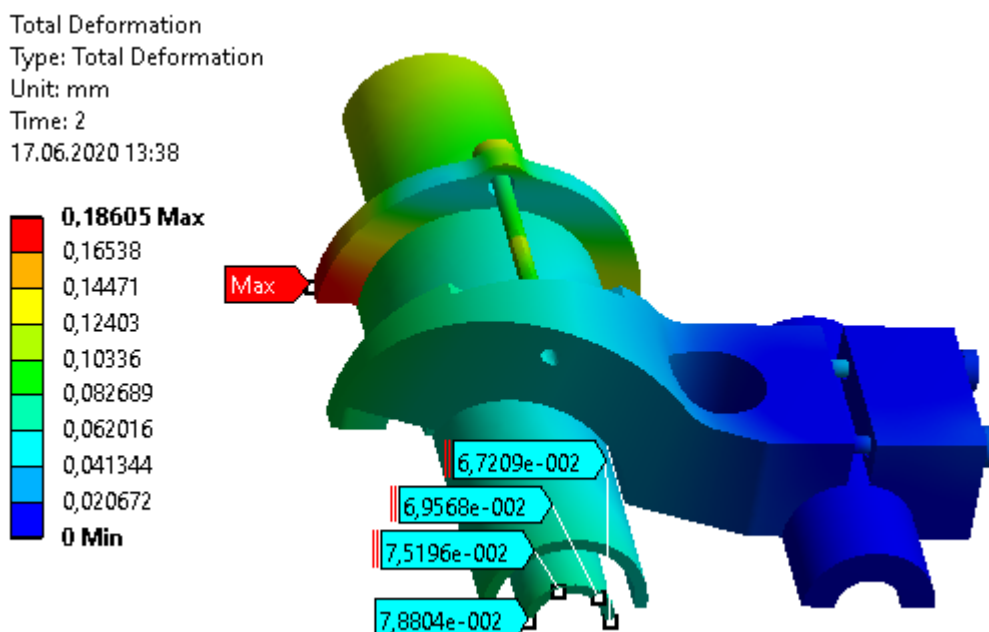
Jak je dále uvedeno, napětí v těle držáku je při protlačení opačným směrem prakticky stejné. Proto bylo možné již teď vypočítat bezpečnost držáku vzhledem k meznímu stavu únavy k_c – viz rovnice (5-5). Korigovaná mez únavy materiálu těla držáku byla spočítána v příloze 12.3.3. Pro výpočet se jako významné maximální napětí uvažovalo napětí na hraně díry pro šrouby svěrného spoje. V tomto místě se vyskytly největší hodnoty napětí z celého těla držáku. Výsledná bezpečnost těla držáku vůči meznímu stavu únavy je naprosto dostatečná.

$$k_{cu} = \frac{\sigma'_{co}}{120 \text{ MPa}} = \frac{185 \text{ MPa}}{120 \text{ MPa}} = 1,54 \quad (5-5)$$

kde k_{cu} je bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavy materiálu a σ'_{co} je korigovaná mez únavy materiálu v MPa.

Protlačování směr nahoru

Při protlačení kapaliny opačným směrem (nahoru) je vyhodnocován posun spodního čela válce – viz Obrázek 5-42. Jelikož se nachází blíž k tělu držáku reometru, je i velikost jeho posunu menší oproti protlačování opačným směrem, kde se vyhodnocuje čelo druhého válce. Stejně jako v předchozí simulaci, i zde byla použita podmínka konvergence pro deformace držáku. Ve výpočtu byla velmi dobrá konvergence (viz Obrázek 5-43) a je vidět, že hodnoty vychýlení čela spodního válce jsou prakticky zanedbatelné.



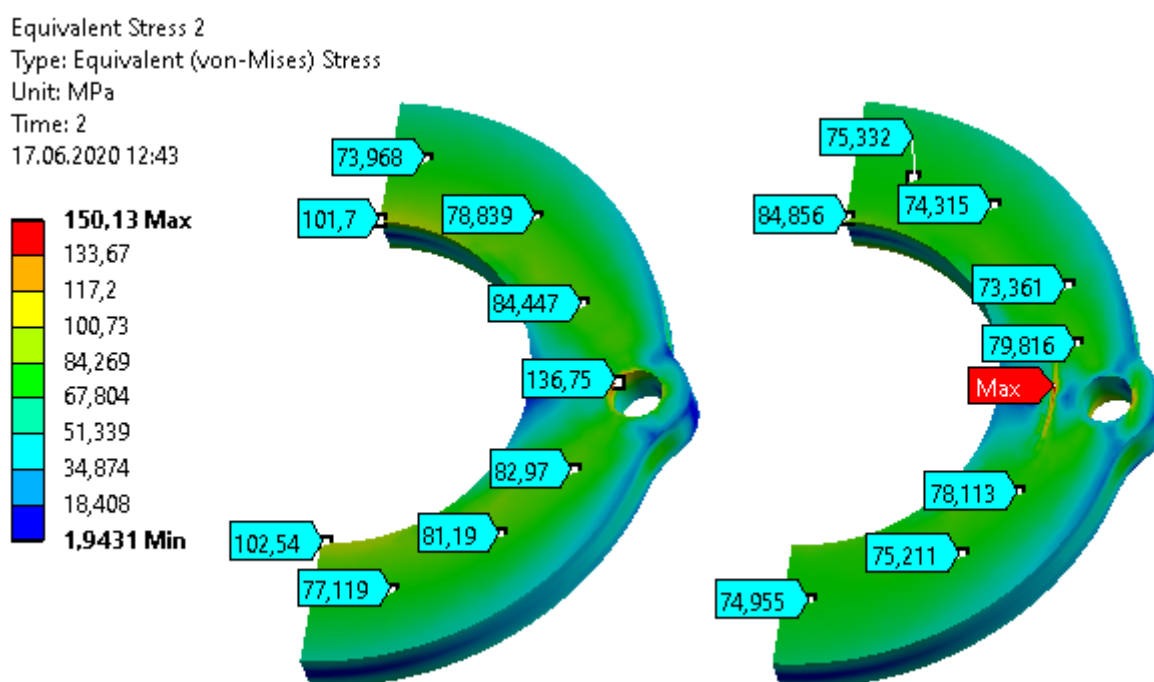
Obrázek 5-42 Protlačování směrem dolů - posun

	Total Deformation 2 (mm)	Change (%)	Nodes	Elements
1	0,12755		111602	34331
2	0,12803	0,37356	109253	56658

Obrázek 5-43 Konvergence

Při protlačení kapaliny směrem nahoru reometr zajišťuje výpalek, který je k tělu držáku připevněn pomocí dvou šroubů. Oproti simulaci provedené pro protlačení kapaliny na opačnou stranu je zde rozdíl, že tělo držáku je namáháno pouze v oblasti od vodící tyče po šrouby držící výpalek. Od těchto šroubů po konec držáku už není namáhán. Velikost významného napětí v těle držáku je zde stejná, jako v simulaci při protlačení opačným směrem. Proto byly výsledky simulace znázorňující napětí přesunuty do příloh této práce – viz příloha 12.3.5.

Výpalek přidržující reometr v držáku je během provozu nejvíce namáhán právě při protlačení kapaliny směrem nahoru, proto se v něm musí vyhodnotit napětí a ověřit jeho bezpečnost. Tento výpalek je totiž namáhán jak předepnutými šrouby, tak silou od lineárního aktuátoru. Obrázek 5-44 zobrazuje výsledky simulace pro obě strany výpalku. Tato simulace měla velmi dobrou konvergenci – viz Obrázek 5-45.



Obrázek 5-44 Napětí ve výpalku přidržující reometr; vlevo: horní strana, vpravo: spodní strana

	Equivalent Stress 2 (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	150,33		111602	34331
2	150,13	-0,13176	110219	58681

Obrázek 5-45 Konvergence výpočtu napětí na výpalku

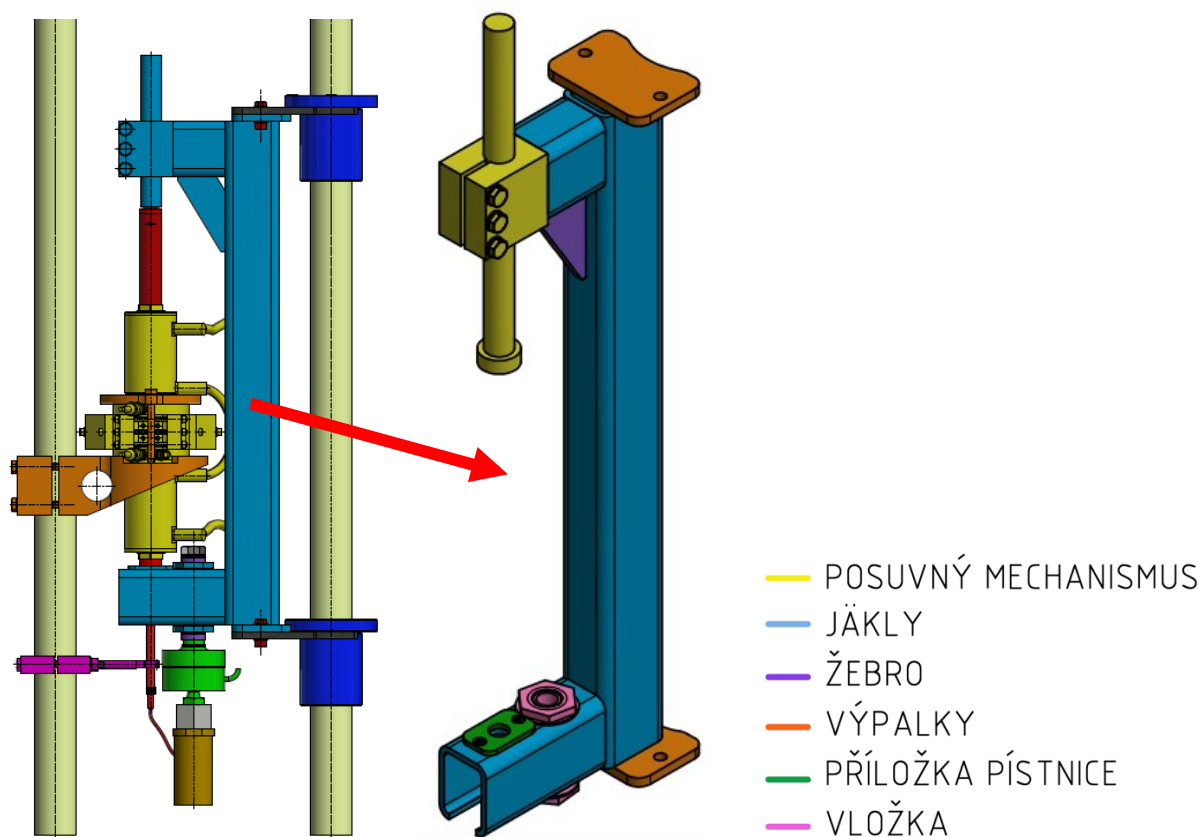
Je vidět, že maximální napětí se objevilo v místě, kde se výpalek opírá o hranu příruby reometru. Výpalek byl vyroben z materiálu 1.4301. Tento materiál má stejné mechanické vlastnosti, jako materiál 1.4307, ze kterého je vyroben držák reometru (viz externí příloha E1). Korigovaná mez únavy pro tento výpalek byla spočítána v příloze 12.3.4. Bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavy vychází velmi dobře – viz rovnice (5-6).

$$k_{cu} = \frac{\sigma'_{co}}{150 \text{ MPa}} = \frac{224 \text{ MPa}}{150 \text{ MPa}} = 1,49 \quad (5-6)$$

kde k_{cu} je bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavy materiálu a σ'_{co} je korigovaná mez únavy materiálu v MPa.

5.4.2 Rám pohonu reometru

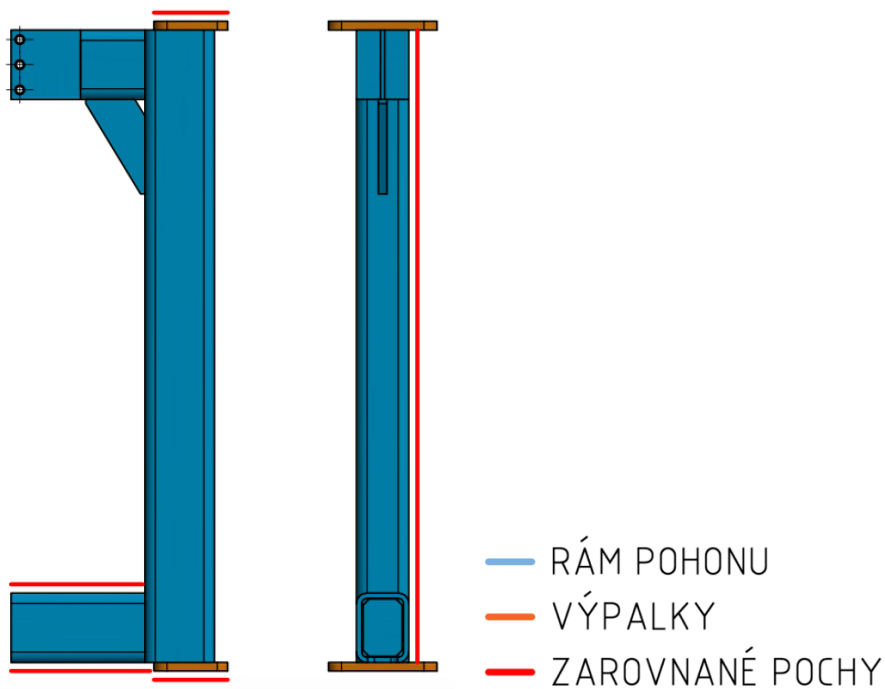
Rám pohonu ve tvaru písmene C je jediné vhodné řešení pro držák reometru umístěný na jedné vodící tyči. Jak již bylo rozepsáno v kapitole 4.3.2 věnující se koncepčním variantám rámu pohonu, vzhledem k jeho geometrii bylo nejvýhodnější k výrobě použít tři svařené jākly. Na tyto svařené jākly se následně přivařily ještě další součásti – žebro, vložka, prvky pro spojení s lineárními ložisky a svěrné pouzdro jako posuvný mechanismus (viz Obrázek 5-46). Výpalky tvoří prvky pro spojení rámu pohonu s lineárními ložisky na vodících tyčích.



Obrázek 5-46 *Vlevo: celková sestava, vpravo: rám pohonu reometru – jednotlivé části*

Výraznou myšlenkou této konstrukce je, že se zde nevyskytuje pevná vazba mezi pístnicemi a rámem pohonu. Jak již bylo zmíněno, pístnice se o rám pohonu pouze opírají svými čelními plochami a jsou přesně vedeny stěnami válců reometru. Je nutné zajistit, aby pístnice dosedaly na opěrné plochy celými čelními plochami. Díky tomu se zajistí axiální působení síly na reometr. Tato situace byla již popsána v kapitole 5.2.

Jelikož je celá konstrukce svařovaná, bylo nutné počítat s deformacemi po svařování, které vzniknou vlivem pnutí v materiálu při jeho chladnutí. K docílení požadované přesnosti se proto musely důležité plochy po svařování zarovnat na frézce – viz Obrázek 5-47.



Obrázek 5-47 Plochy určené k zarovnání po svařování

Velmi důležité jsou plochy na dvou výpalcích, které slouží ke spojení rámu pohonu s lineárními ložisky na vodící tyči. Osa vodící tyče totiž udává referenci svislého směru a vzhledem k této ose musí být obě plochy na výpalcích kolmé. Díky přesným plochám nebudou hrozit nepřesnosti při montáži rámu pohonu na lineární aktuátor. Jediná odchylka může vzniknout při jeho posunu, nemůže vzniknout žádné úhlové natočení. Právě kvůli přesnému ustavení během montáže bylo navrženo použití dvou lineárních ložisek, čemuž odpovídají dva výpalky. Princip spojení byl rozebrán dále v téhle kapitole.

Díky zajištění přesné montáže rámu pohonu na rám hydraulického pulsátoru Inova nemůže dojít k vychýlení dalších ploch, které kvůli požadavku na přesnost byly také zarovnány na frézce. Tyto plochy jsou totiž rovnoběžné s plochami na výpalcích. Ve spodní části rámu pohonu je vidět, že profil byl zarovnán shora i ze spodní strany. To bylo řešeno jednak kvůli zmiňované přesnosti dosedací plochy pro pístnici, dále kvůli vložce použité pro spojení s lineárním aktuátorem.

V horní části rámu pohonu byl zvolen jako posuvný mechanismus svěrný spoj (podrobněji je to popsáno dále v téhle kapitole). Na svěrném spoji se nezarovnávají plochy, protože díra pro tyč se vrtala až jako následující operace po zarovnání na frézce. Podle zarovnaných ploch bylo možné ustavit rám pohonu tak, aby osa díry ve svěrném spoji byla na tyto plochy kolmá.

Za zmínku určitě stojí zarovnání celého boku rámu pohonu. Toto zarovnání bylo nutné z technologických důvodů. Kvůli rozměrům se totiž rám pohonu musel na frézku položit na stranu. Tato strana se proto zarovnala a před zarovnáním se přesně ustavila pomocí úchylkoměru.

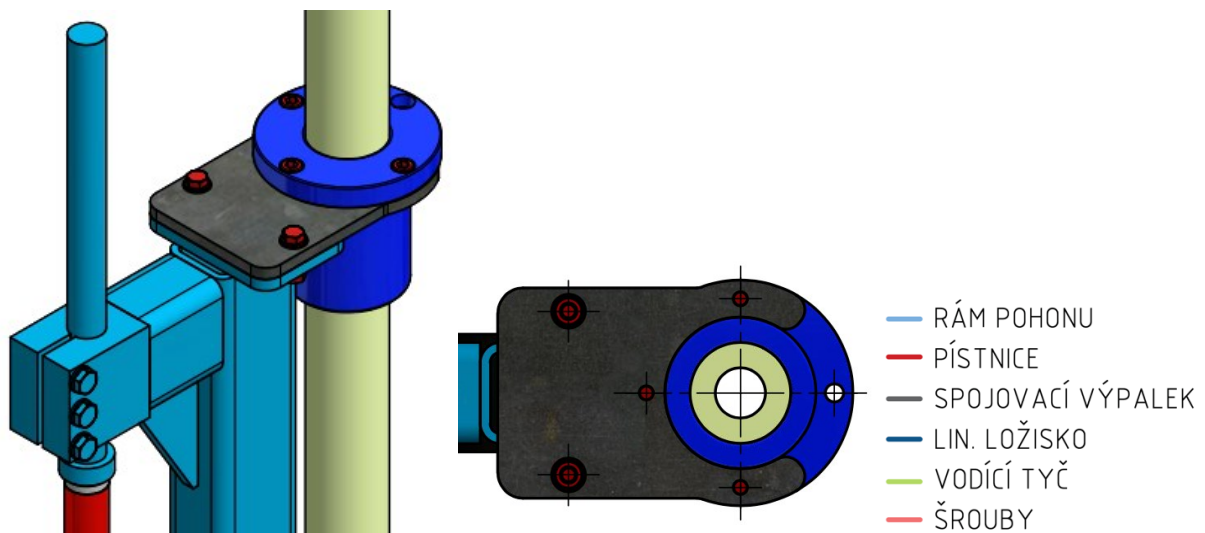
Rám pohonu reometru vznikal v těchto hlavních krocích:

- svaření celku
- zarovnání důležitých ploch na frézce
- vrtání díry ve svěrném pouzdra a díry pro vložku

Ke spojení rámu pohonu s lineárním ložiskem na vodící tyči byl na každé straně použit ještě jeden spojovací výpalek – viz Obrázek 5-48. Tento spojovací výpalek je připevněný k ložisku a zajišťují ho tři šrouby. S rámem pohonu je spojený pomocí dvou šroubů. Všechny šrouby jsou velikosti M10, aby byla zachována jednotnost závitů na celém pohonu.

Přesnost tohoto spojení je klíčová pro další zarovnané plochy. Pokud se rám pohonu do rámu hydraulického pulsátoru Inova namontuje např. pootočený, tak to přímo ovlivní i přesnost zarovnaných ploch vzhledem k ose reometru. Proto byl výpalek přivařený na rám pohonu ještě zarovnaný na frézce. Tento výpalek i spojovací výpalek na lineárním ložisku byl navrhnut tak, aby mezi nimi byla velká kontaktní plocha, což umožní přesné ustavení.

Geometrie spojovacího výpalku byla navržena tak, aby přesně obepínal válcovou plochu na ložisku a zároveň tak, aby jej bylo možné na ložisko nasadit vzhledem k průměru vodící tyče. Díky přesnosti uložení budou výpalky na ložiscích vždy uloženy přesně a jednoduše tvarově zachytí radiální síly.



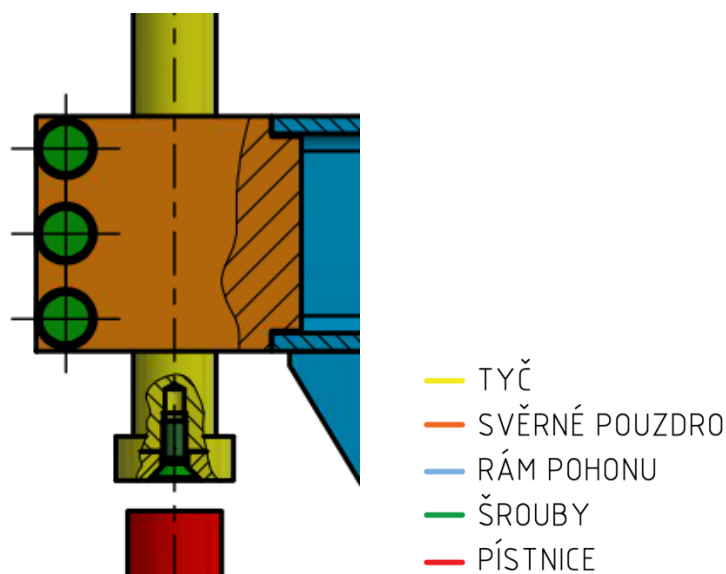
Obrázek 5-48 Horní část rámu pohonu reometru

Obrázek 5-48 zároveň poskytuje pohled na horní část rámu pohonu. Je vidět, že jako posuvný mechanismus byl použit svěrný spoj. Jeho největší výhodou je snadné a hlavně rychlé nastavení požadované polohy tyče. Reometr totiž umožňuje měřit různé objemy kapaliny v intervalu od 30 ml do 100 ml při různé délce štěrbiny. Kvůli tomu musí být v rámu pohyblivý člen, který umožní jednak nastavení potřebné vůle mezi rámem pohonu a pístnicí umožňující tepelnou dilataci kapaliny, ale jeho hlavní úlohou bude přizpůsobit se různé výšce čela pístnice v závislosti na objemu kapaliny v reometru a na délce štěrbiny.

Horní část rámu pohonu detailně znázorňuje Obrázek 5-49. Je zde zároveň znázorněna vůle mezi pístnicí a čelem tyče. V případě, že nebude dodržena rovnoběžnost mezi čelem pístnice a dosedací plochou na tyči, bude možné tento kontakt dále upravit např. pomocí kulové plochy. Díky tomu vznikne mezi těmito součástmi bodový kontakt a ten umožní kompenzaci nepřesností.

Tyč bude vyrobena z polotovaru taženého za studena, tzn. bylo možné jej sehnat v požadované přesnosti pro svěrný spoj. Jediná výrobní operace tak byla zkrácení na požadovanou délku, výroba zkosení a závitů v čelní straně. Tyč má menší průměr než pístnice kvůli hmotnosti, proto je na jejím čele závit, aby k ní bylo možné ještě přišroubovat čelo zvětšující kontaktní plochu s čelem pístnice. Případně je možné čelo na tyči odšroubovat a použít tyč přímo jako pístnici.

Na těle svěrného pouzdra byl vyroben zámek. Tento zámek zjednoduší ustavení polohy svěrného pouzdra během svařování k profilu rámu pohonu. Zároveň je ke dvěma vnitřním stěnám profilu přivařen, což zlepšuje rozložení napětí v rámu pohonu (viz dále v téhle kapitole u strukturálních analýz). Svěrné pouzdro stahují tři šrouby. Opět byl použit závit M10 kvůli sjednocení všech šroubů na rámu pohonu reometru. Výpočet šroubů svěrného spoje byl proveden ve výpočtové části této kapitoly.



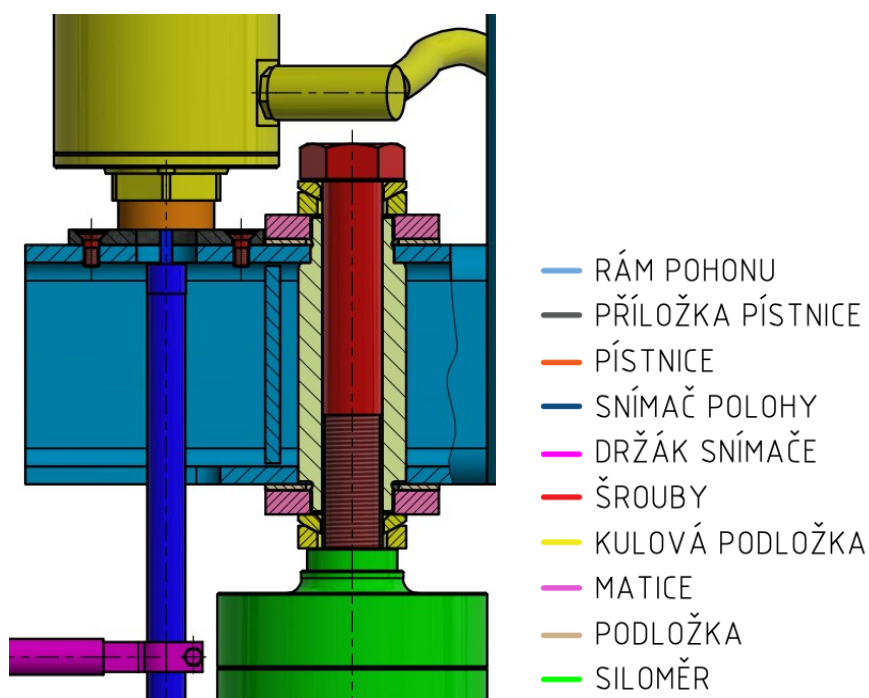
Obrázek 5-49 Horní část rámu pohonu reometru

Ve spodní části rámu pohonu bylo řešeno snímání polohy plovoucího pístu a také spojení s lineárním aktuátorem. Provedení celé spodní části znázorňuje Obrázek 5-50. Umístění snímače polohy plovoucího pístu do spodní části rámu pohonu bylo nejnázorněji proveditelné, protože ovlivňuje geometrii nejmenšího množství součástí. Bylo potřeba pouze upravit spodní profil a to tak, že do jeho horní stěny se vyvrtala díra a do spodní stěny se vyfrézovala drážka. Drážka ve spodní stěně je nutná, protože jinak by vznikla kolize s ramenem držáku snímače.

Toto provedení umožňuje jako jediná varianta přímé napojení snímače na plovoucí píst bez nutnosti dalších spojovacích prvků. Ke spojení snímače s plovoucím pístem se použije magnet, což je již vyzkoušené a ověřené řešení z předchozí evoluce slit-flow reometru. Držák snímače byl řešen v samostatné kapitole 5.5.1.

Do budoucna se uvažuje povrchová úprava lakováním rámu pohonu, proto byla do místa kontaktu s pístnicí umístěna příložka. Tato příložka je vypálena z 5 mm nerezového plechu a nebude nabarvena. Díky tomu se zabrání oděru a loupání barvy v tomto místě. Zároveň bude síla od pístnice rozložena na větší plochu spodního profilu rámu pohonu. Díra pro snímač polohy plovoucího pístu proto musí být vyvrtána i v této příložce. Příložku drží na místě dva šrouby se zápusťnou hlavou.

Vrtání této díry bylo navrženo až v okamžiku přišroubování příložky ke spodnímu profilu. Vzhledem k výrobním a montážním nepřesnostem bude poloha díry určena až na základě měření polohy osy reometru po namontování pohonu na rámovou konstrukci hydraulického pulsátoru Inova. Mezi dírou a snímačem bude 4 mm vůle. Díky tomu, že se tato díra bude vrtat na obou součástech zároveň, bude zajištěna sousost v obou součástech.



Obrázek 5-50 Spodní část pohonu reometru

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.3.2, jediná možnost spojení rámu pohonu s lineárním aktuátorem je přes siloměr pomocí šroubu. Spojení siloměru s lineárním aktuátorem bylo řešeno v samostatné kapitole 5.5.2. Připojovací závit siloměru je M20x1,5.

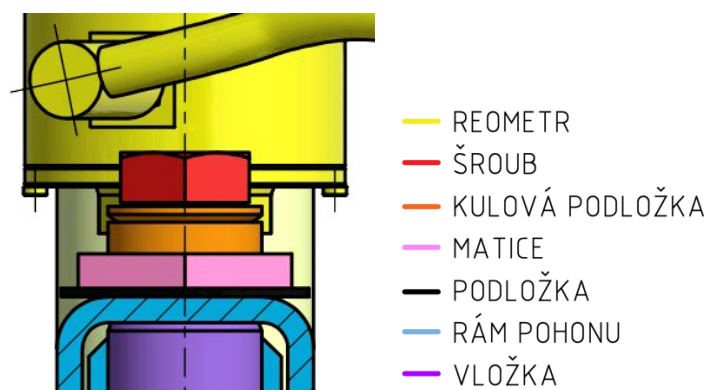
Tento šroub prochází vložkou, která je uložena ve spodním profilu rámu pohonu kvůli lepšímu rozložení namáhání během protlačení kapaliny. Z představených variant byla vybrána varianta výměnné vložky. Oproti navarené vložce sice nezajišťuje rozložení namáhání na obě stěny spodního profilu pro oba směry zatěžování, za to je ale možná její demontovatelnost a následná další úprava podle potřeby. Díky maticím je zatížení rozloženo na větší plochu profilu rámu pohonu.

Na obě matice z obou stran dosedají kulové podložky, takže samotná vložka není namáhána silou od lineárního aktuátoru. Pod maticemi jsou podložky, které zajišťují lepší rozložení napětí na stěnu profilu a také během utahování nebo povolování matic zajistí, že se barva na povrchu rámu pohonu neodře.

Aby kulové podložky byly funkční, musí být mezi šroubem a vložkou vůle. Právě kvůli této vůli se zvolila varianta výměnné vložky, aby ji bylo možné v případě nutnosti zvětšit. Kulové podložky se uvažovaly ze dvou důvodů. Tím prvním důvodem bylo, aby rám pohonu reometru nebyl závislý na přesném uložení lineárního aktuátoru. U budoucí konstrukce standalone zařízení nějaké nepřesnosti mohou vzniknout a právě kulové podložky řeší nezávislost rámu pohonu na montážních nepřesnostech lineárního aktuátoru. Dalším důvodem bylo zamezení působení ohybového momentu při protlačení kapaliny na siloměr umístěný hned pod rámem pohonu. Díky kulovým podložkám a vůli mezi vložkou a šroubem bude zajištěno, že siloměr nebude namáhán ohybovým momentem.

Na základě simulací protlačení byla do spodního profilu rámu pohonu přidána ještě výztuha, která snižuje maximální velikost napětí v profilu.

V horní poloze rámu pohonu se rychlospojka na temperačním válci reometru příliš přiblížila šroubu, který spojuje rám pohonu s lineárním aktuátorem. Kvůli tomu byla vychýlena, aby zde vzniklo víc prostoru – viz Obrázek 5-51. Vychýlení bylo provedeno na obou válcích temperačního obvodu, aby byly záměnné.

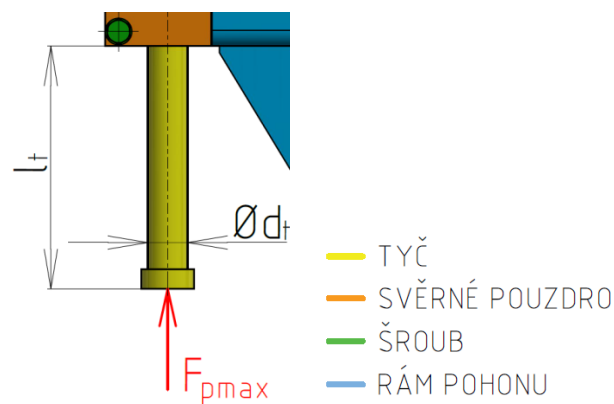


Obrázek 5-51 Vychýlení rychlospojky

Výpočty

Na rámu pohonu reometru se analyticky kontrolovaly dvě jeho části. Jednalo se o kontrolu tyče vzhledem k meznímu stavu vzpěrné stability a dále se kontrolovaly šrouby svěrného spoje.

Kontrola tyče vzhledem k meznímu stavu vzpěrné stability byla provedena v příloze 12.4.1. Při výpočtu se uvažovalo maximální vysunutí tyče l_t při maximální síle F_{pmax} od lineárního aktuátoru – viz Obrázek 5-52. Aby byl výpočet dostatečně konzervativní, zavedl se do výpočtu návrhový součinitel $k_n = 3$, který zvýšil sílu F_{pmax} . Na základě výpočtu v téhle výpočtové části se určil průměr tyče $d_t = 30$ mm, který má bezpečnost vzhledem k meznímu stavu vzpěrné stability $k_v = 3,06$. Tato hodnota bezpečnosti vyšla už pro zvolený návrhový součinitel.



Obrázek 5-52 Namáhání tyče

K výpočtu potřebné síly předpětí šroubů svěrného spoje byla opět využita aplikace v programu Autodesk Inventor Professional 2019. Na základě tohoto výpočtu byla v příloze 12.4.2 spočítána potřebná síla předpětí jednoho šroubu $F_i = 12,5$ kN. Ve výpočtu byla nastavena poměrně vysoká hodnota součinitele bezpečnosti proti prokluzu $k_{pr} = 3$, aby byla jistota, že nemůže dojít k jejímu proklouznutí. Výpočet byl proveden tak, aby na svěrném spoji byli tři šrouby se závitem M10. To je stejný rozměr, jaký mají šrouby na držáku reometru, takže k obsluze bude stačit jeden nástroj. Šrouby svěrného spoje jsou nejvíce namáhány během utahování. Oproti šroubům svěrného spoje na držáku reometru jsou ale výrazně méně zatížené. Potřebný utahovací moment těchto šroubů je $M_u = 32$ Nm (viz rovnice (12-69)).

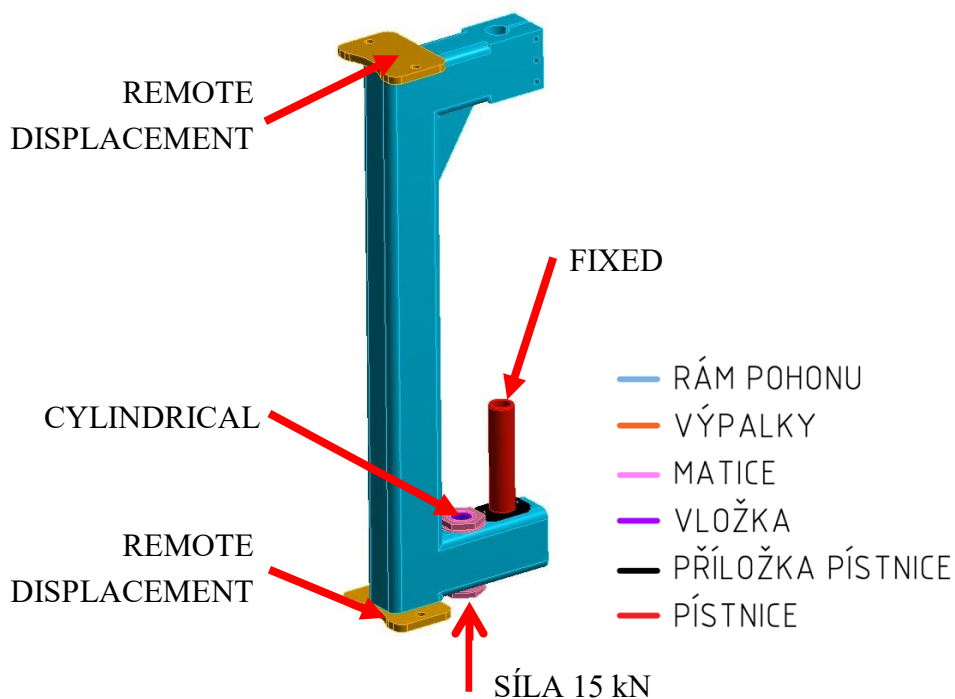
Během utahování mají šrouby bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti $k_{msp} = 1,79$ (viz rovnice (12-73)). Minimální potřebná hloubka zašroubování, aby nedošlo k překročení povoleného tlaku v závitech, je podle rovnice (12-74) 6 mm.

Stejně jako držák reometru, i rám pohonu se ověřoval pro oba směry zatěžování při maximálním provozním zatížení 15 kN. Opět byl kladen požadavek na vysokou tuhost, aby nedošlo k ovlivnění pravého úhlu mezi osou pístnice a dosedací plochou na rámu pohonu (viz Obrázek 5-1 v kapitole 5.2). Celý rám pohonu byl zhotoven z uzavřeného dutého profilu o rozměrech 80 x 60 x 6 mm z materiálu S235JRH. Korigovaná mez únavy byla spočítána v příloze 12.4.3.

Jednotlivé profily rámu pohonu reometru jsou mezi sebou svařené. Jedná se převážně o koutové svary, V-svary a ½ oblé svary. Aby se tyto svary zohlednily i v simulaci, byla k tomu použita funkce v programu Inventor Professional 2019, která slouží k vytvoření geometrie svaru. Po jejich vytvoření se celý rám pohonu reometru sloučil do jedné součásti a takto vytvořený model se použil v simulaci. Materiál svaru musí mít lepší mechanické vlastnosti, než materiál svařovaných součástí.

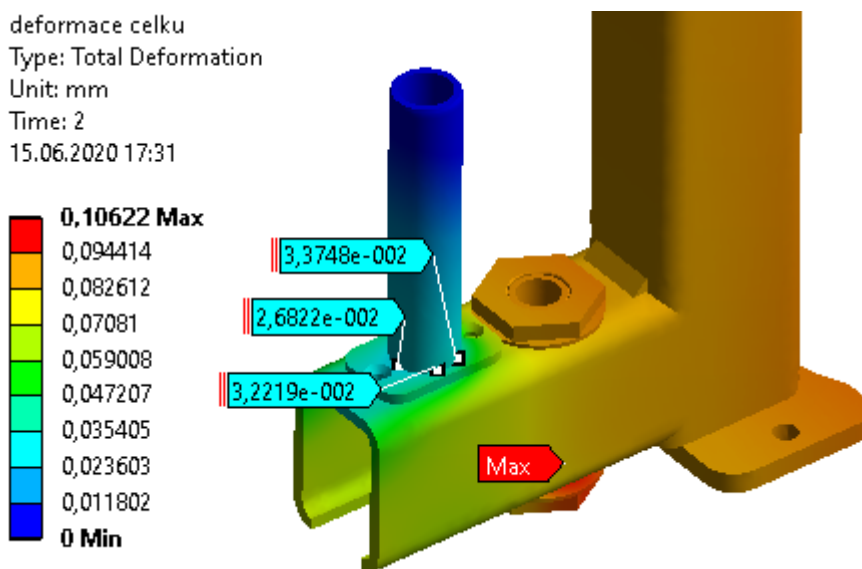
Protlačování směr nahoru

Obrázek 5-53 zobrazuje model použitý pro simulaci. Okrajové podmínky pro model byly zadány následovně: na vodorovných plochách výpalků remote displacement s volným směrem pouze ve směru působení síly lineárního aktuátoru (odpovídá spojení s lineárními ložisky na vodících tyčích), čelo pístnice je zajištěno vazbou fixed, v díře vložky je vazba cylindrical s volným axiálním směrem (odpovídá spojení s lineárním aktuátorem). Zatížení 15 kN bylo aplikováno na matici na plochu odpovídající dosedací ploše kulové podložky. Kontakt čela pístnice s rámem pohonu byl nastaven jako třecí se součinitelem tření 0,15.



Obrázek 5-53 Model použitý pro simulaci, protlačení nahoru

Spodní část rámu pohonu vykazuje velmi dobrou tuhost, což dobře znázorňuje Obrázek 5-54. Je vidět, že průhyb v místě kontaktu s pístnicí je prakticky zanedbatelný. Maximální hodnota se vyskytla na matici vložky, její velikost je ale stále velmi malá a nemá žádný vliv. Výpočet měl velmi dobrou konvergenci – viz Obrázek 5-55.



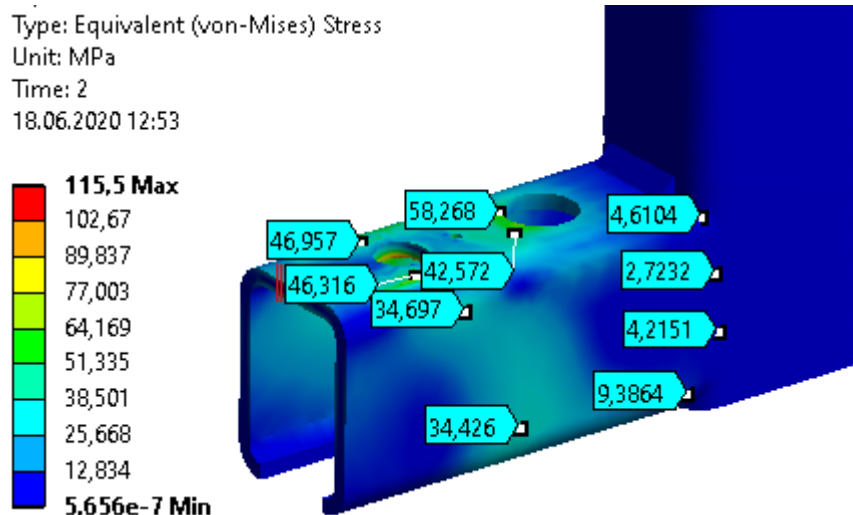
Obrázek 5-54 Deformace rámu pohonu - směr nahoru

	deformace celku (mm)	Change (%)	Nodes	Elements
1	0,10634		81233	41231
2	0,10622	-0,1151	206287	121271

Obrázek 5-55 Konvergence výpočtu deformace rámu pohonu - směr nahoru

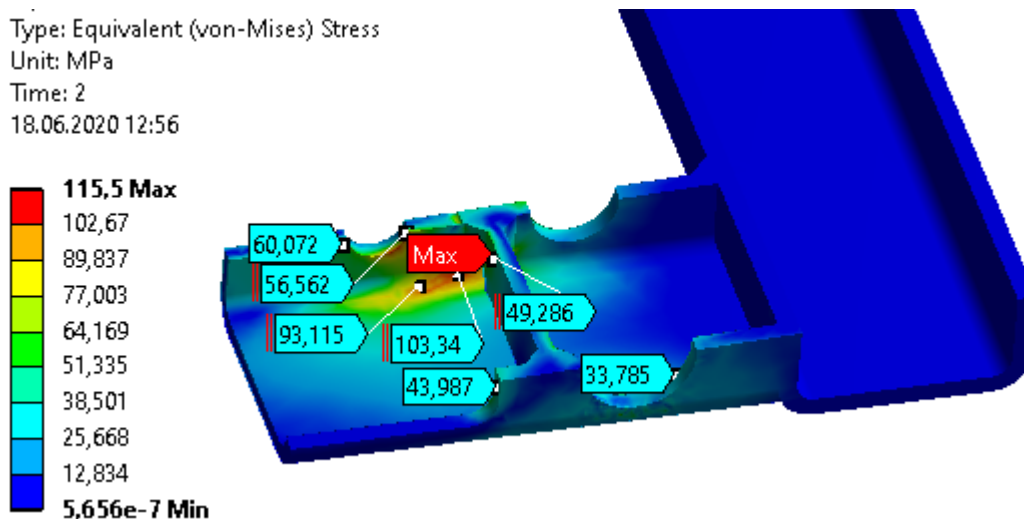
Během protlačení kapaliny směrem nahoru je nejvíce zatěžovanou částí rámu pohonu jeho spodní profil. Při vyhodnocování napětí je pro lepší přehlednost zobrazen pouze rám pohonu tvořený svařenými profily, nicméně simulace proběhla na celém modelu, jak jej znázorňuje Obrázek 5-53. Kvůli lepšímu rozložení namáhání byla přidána ještě vzpěra.

Obrázek 5-56 poskytuje pohled na napětí ve spodním profilu na jeho vnější části. Je vidět, že napětí v místě svaru se svislým profilem je velmi nízké. Největší hodnoty jsou v oblasti, kde dosedá pístnice. I tak ale napětí na vnější stěně profilu nepřekračuje hodnotu 60 MPa.

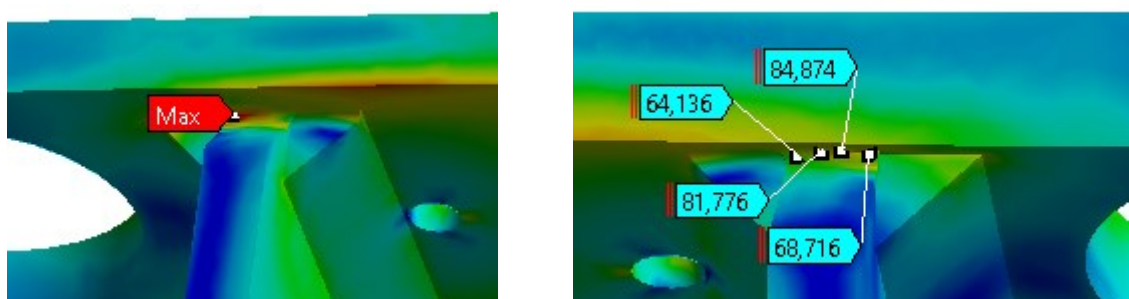


Obrázek 5-56 Protlačování nahoru, napětí ve spodním profilu

Napětí ve spodním profilu v jeho vnitřní části zobrazují dva obrázky – Obrázek 5-57 a Obrázek 5-59. Je vidět, že zde jsou hodnoty větší než na vnější stěně profilu. Maximální hodnota se vyskytla na hraně vzpěry navažené v profilu (viz Obrázek 5-58).

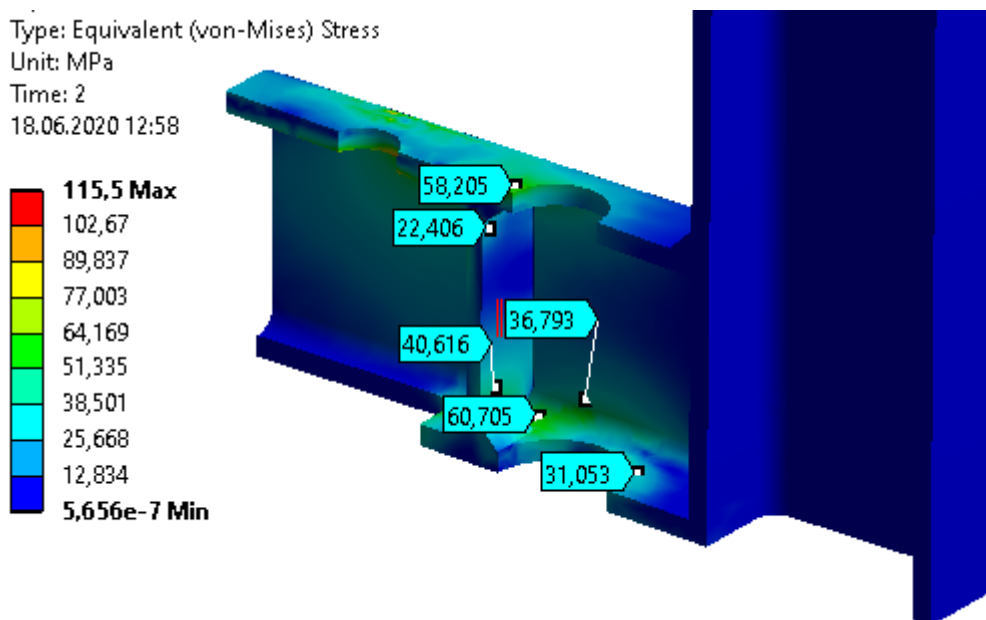


Obrázek 5-57 Protlačování nahoru, napětí ve vnitřní části profilu



Obrázek 5-58 Vlevo: maximální napětí na vzpěře, vpravo: druhá strana vzpěry

Jak je vidět (viz Obrázek 5-58 vlevo), tato maximální hodnota napětí se objevila na hraně mezi vzpěrou a profilem. Hodnota v tomto místě bude ignorována, protože pravděpodobně vznikla chybou výpočtu. Rám pohonu je symetrický a stejně tak zatížení. Na druhé straně vzpěry jsou napětí výrazně nižší (viz Obrázek 5-58 vpravo). Výpočet měl dobrou konvergenci – viz Obrázek 5-60.



Obrázek 5-59 Protlačení nahoru, napětí ve vnitřní části profilu

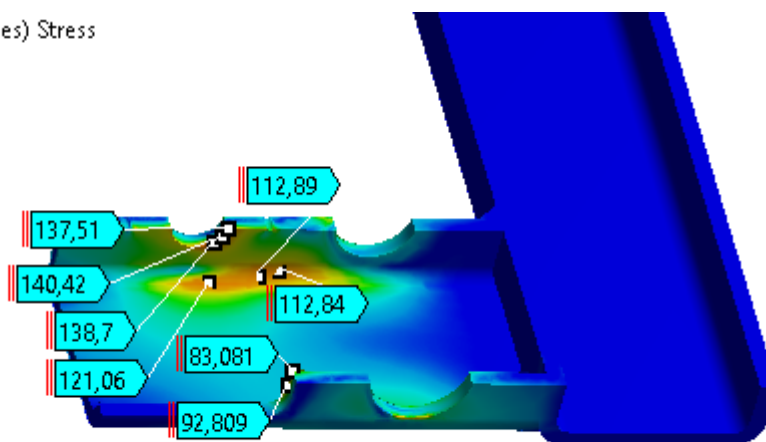
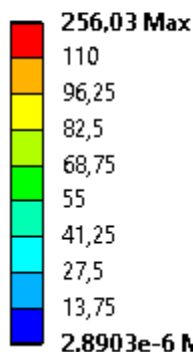
	Equivalent Stress (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	114,09		86120	40498
2	115,5	1,2303	118222	60781

Obrázek 5-60 Konvergence výpočtu napětí

Před vyhodnocením bezpečnosti rámu pohonu bylo nutné ještě provést simulaci pro protlačení kapaliny směrem dolů. Z těchto dvou zatěžovacích stavů se následně k vyhodnocení bezpečnosti vybral ten, při kterém jsou vzniklá napětí největší.

Obrázek 5-61 poskytuje pohled na napětí ve vnitřní části spodního profilu bez vzpěry. Při porovnání s provedením se vzpěrou (viz Obrázek 5-57) je vidět, že napětí jsou výrazně vyšší především v místě díry pro snímač a ve spodní části profilu, kde je drážka pro snímač.

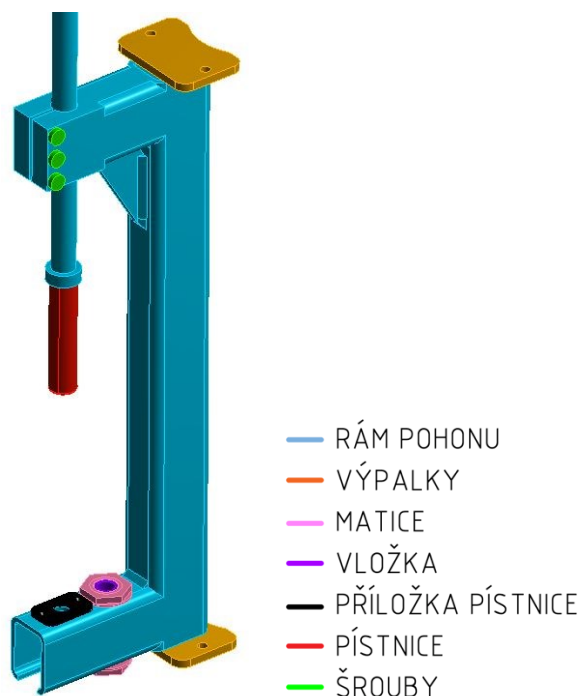
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 2
 24.06.2020 16:23



Obrázek 5-61 Napětí ve spodním profilu bez vzpěry

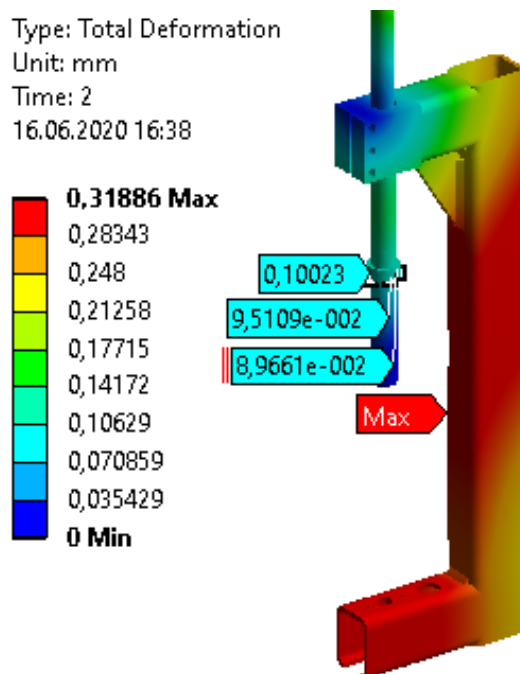
Protlačování směrem dolů

Okrajové podmínky při protlačení kapaliny opačným směrem jsou prakticky stejné, jako u předchozí simulace. Jediný rozdíl spočívá v tom, že se rám pohonu opírá o horní pístnici, jejíž čelo je zavazbeno vazbou fixed a síla od lineárního aktuátoru působí opačným směrem a je umístěna na horní matici vložky. Šrouby svěrného spoje byly předepnuty na potřebnou sílu předpětí z analytického výpočtu $F_i = 12,5$ kN. Model použitý pro simulaci zobrazuje Obrázek 5-62.



Obrázek 5-62 Model použitý pro simulaci, protlačení dolů

Obrázek 5-63 zobrazuje deformaci rámu pohonu při protlačení kapaliny směrem dolů. Je vidět, že v místě kontaktu s pístnicí jsou deformace vyšší, než při protlačení opačným směrem. Nicméně i tak jsou prakticky zanedbatelné, protože největší hodnota vychýlení má přibližně 0,1 mm. Největší deformace se objevila přibližně uprostřed svislého profilu. Výpočet deformace měl velmi dobrou konvergenci, kterou obrazuje Obrázek 5-64.

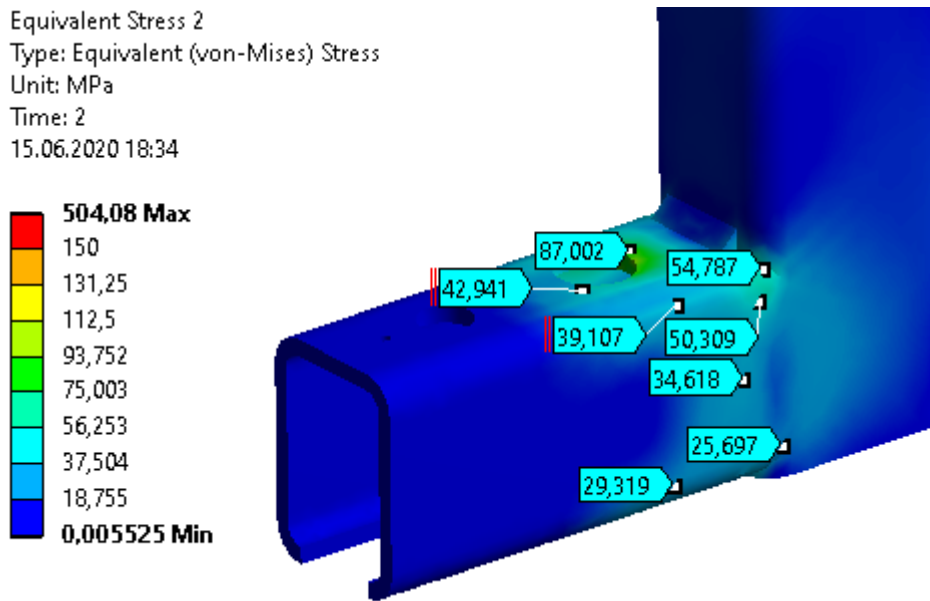


Obrázek 5-63 Deformace rámu pohonu – směr dolů

	deformace důležitých částí (mm)	Change (%)	Nodes	Elements
1	0,32099		87260	44322
2	0,31883	-0,67742	118928	65106
3	0,31886	1,1791e-002	145951	83091

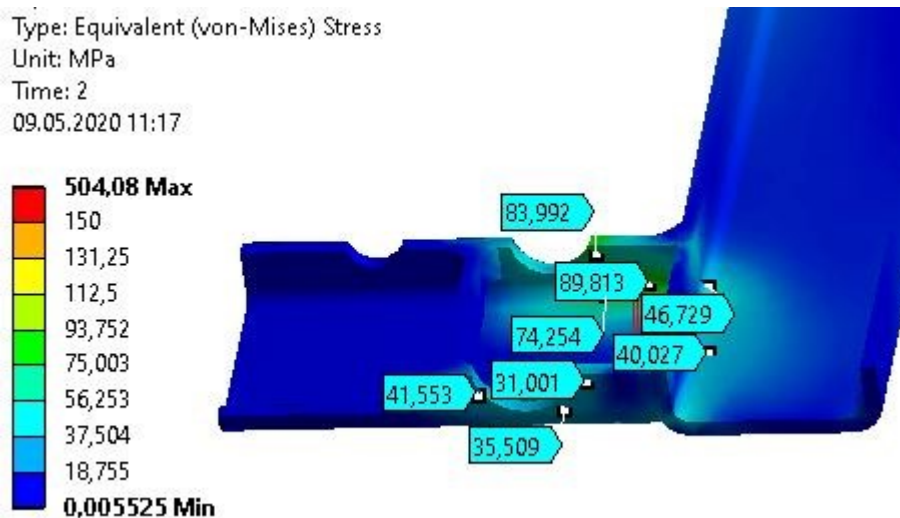
Obrázek 5-64 Deformace rámu pohonu – směr dolů, konvergence

Napětí na vnějších stěnách spodního profilu jsou opět velmi nízká – viz Obrázek 5-65. Vysoká hodnota napětí se vyskytla v místě, kde se o stěnu spodního profilu opírá matice vložky. Zde se napětí pohybuje pod 90 MPa. V místě svaru dvou profilů je napětí výrazně nižší a jeho hodnota se pohybuje pod 55 MPa.

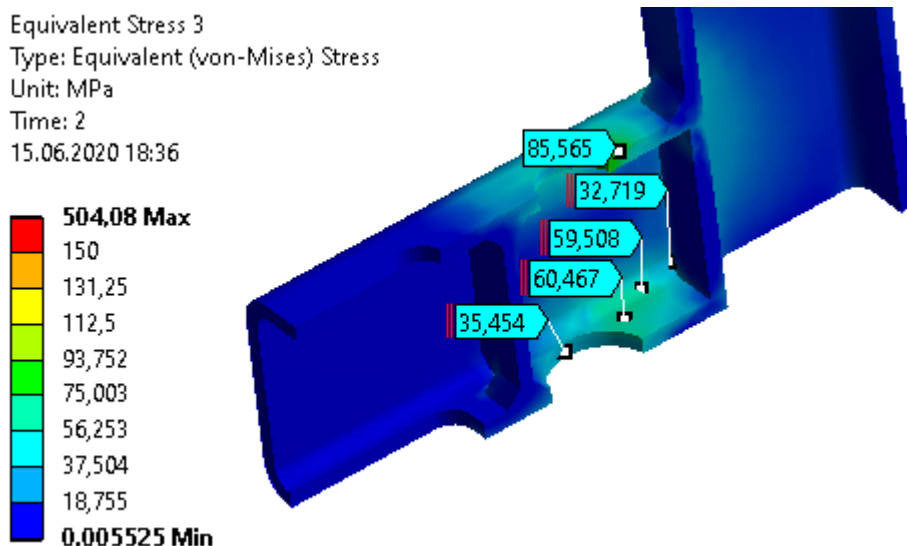


Obrázek 5-65 Napětí ve spodním profilu rámu pohonu při protlačení směrem dolů – vnější

Při pohledu na vnitřní stěny spodního profilu je vidět, že napětí je i v těchto místech relativně nízké – viz Obrázek 5-66 a Obrázek 5-67. Maximální hodnota napětí se vyskytla v horní části rámu pohonu, která byla rozebrána dále. Výpočet napětí celého rámu pohonu měl velmi dobrou konvergenci – viz Obrázek 5-68.



Obrázek 5-66 Napětí ve spodním profilu rámu pohonu při protlačení směrem dolů - vnitřní

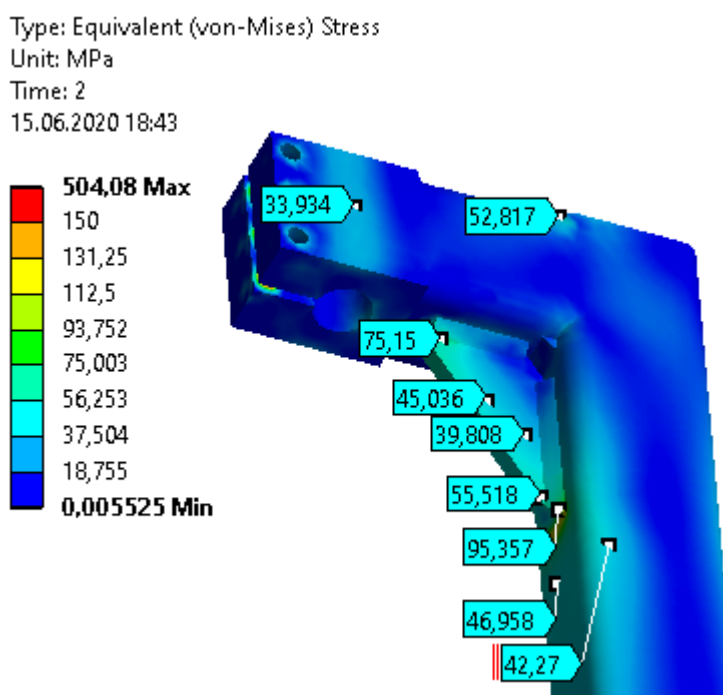


Obrázek 5-67 Napětí ve spodním profilu rámu pohonu při protlačení směrem dolů – vnitřní

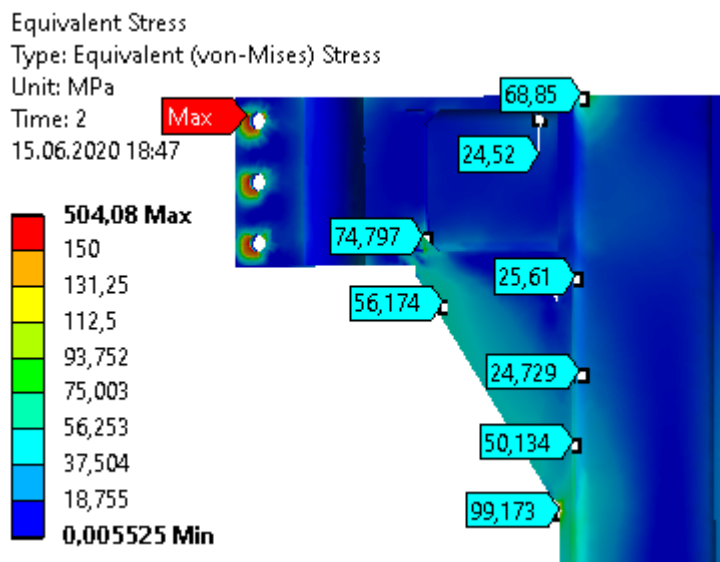
	napětí C (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	218,97		87260	44322
2	475,47	73,873	118928	65106
3	504,08	5,8416	145951	83091

Obrázek 5-68 Konvergence výpočtu napětí při protlačení kapaliny dolů

Stejně jako ve spodní části držáku, i v jeho horní části jsou napětí relativně nízká – viz Obrázek 5-69 a Obrázek 5-70. Největší hodnoty se objevily na obou stranách žebra, přičemž ani jedna z nich nepřekračuje 100 MPa. Největší napětí se objevilo na svěrném pouzdru, konkrétně na hraně díry se závitem pro šroub. Díra se závitem v tomto místě byla zkontrolována analyticky při výpočtu šroubů (viz kapitola 12.4.2).



Obrázek 5-69 Napětí v horní části rámu pohonu - protlačení směrem dolů



Obrázek 5-70 Napětí v horní části rámu pohonu (řez) - protlačení směrem dolů

Vyhodnocení bezpečnosti rámu pohonu

Po provedení strukturálních analýz pro oba směry protlačování bylo možné určit bezpečnost rámu pohonu vzhledem k meznímu stavu únavy. Při protlačení kapaliny směrem nahoru je jednoznačně nejvíce namáhán spodní profil rámu pohonu, kde se největší významné napětí pohybuje kolem hodnoty 103 MPa (viz Obrázek 5-57). Při protlačení kapaliny směrem dolů se největší hodnota napětí objevila v místě žebra pod svěrným pouzdem (viz Obrázek 5-70). Napětí v tomto místě vyšlo téměř shodné, jako maximum ve spodním profilu při protlačení směrem dolů. Hodnota největšího napětí pro protlačení směrem nahoru je přibližně 99 MPa. Bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavy se spočítá podle rovnice (5-7). Korigovaná mez únavy σ'_{co} byla spočítána v příloze 12.4.3.

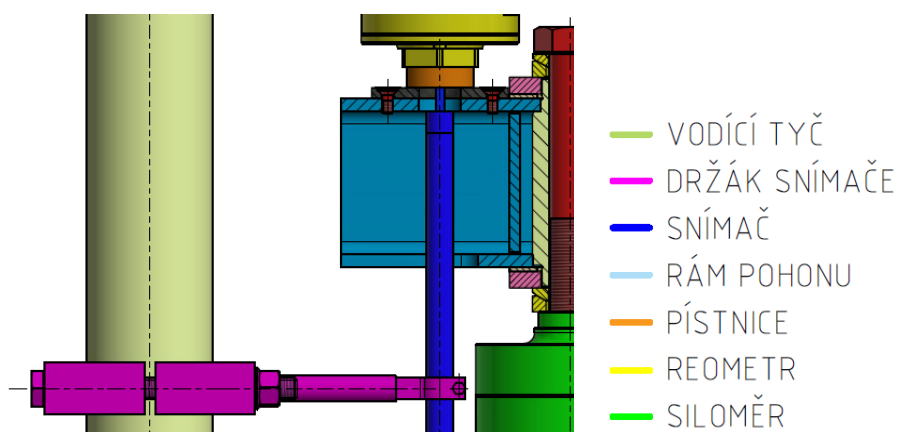
$$k_{cu} = \frac{\sigma'_{co}}{103 \text{ MPa}} = \frac{127 \text{ MPa}}{103 \text{ MPa}} = 1,23 \quad (5-7)$$

kde k_{cu} je bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavy materiálu a σ'_{co} je korigovaná mez únavy v MPa.

5.5 Ostatní části konstrukce reometru

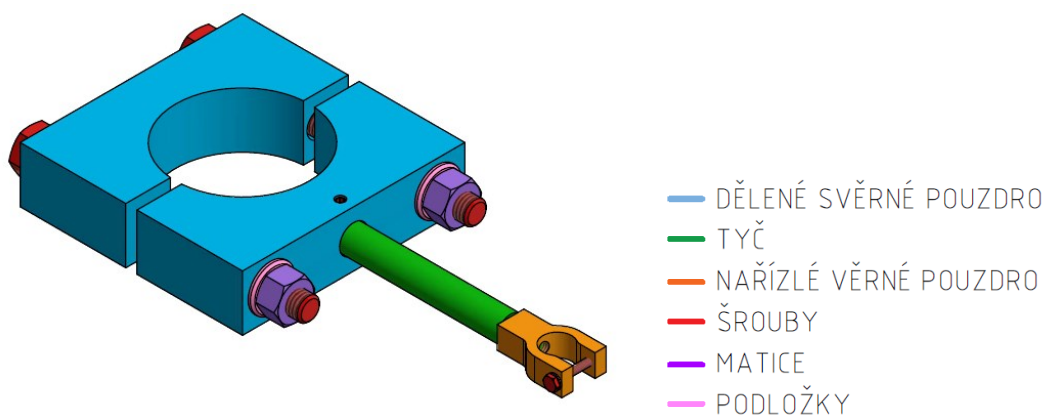
5.5.1 Držák snímače polohy plovoucího pístu

Umístění snímače s ohledem na jeho připojení k plovoucímu pístu reometru bylo popsáno v kapitole 4.4. Tato kapitola se věnuje pouze konstrukčnímu provedení držáku snímače, který je upevněn na jedné vodící tyči – viz Obrázek 5-71. Aby držák neovlivňoval přesnost měření, je důležitá jeho tuhost a stabilní upevnění.



Obrázek 5-71 Umístění držáku snímače

Konstrukce držáku je velmi jednoduchá. Obrázek 5-72 přehledně zobrazuje celý držák. Vzhledem k jeho upevnění na vodící tyč je hlavní částí držáku dělené svěrné pouzdro, které je staženo dvěma šrouby. V jedné půlce svěrného pouzdra je radiálně vyvrtána díra, která lícuje s tyčí. Tyč je v ní přesně vedena s minimální vůlí a její poloha se zajišťuje pomocí stavěcího šroubu. Na konci tyče je druhé, menší, svěrné pouzdro, do kterého je umístěn snímač.



Obrázek 5-72 Držák snímače plovoucího pístu

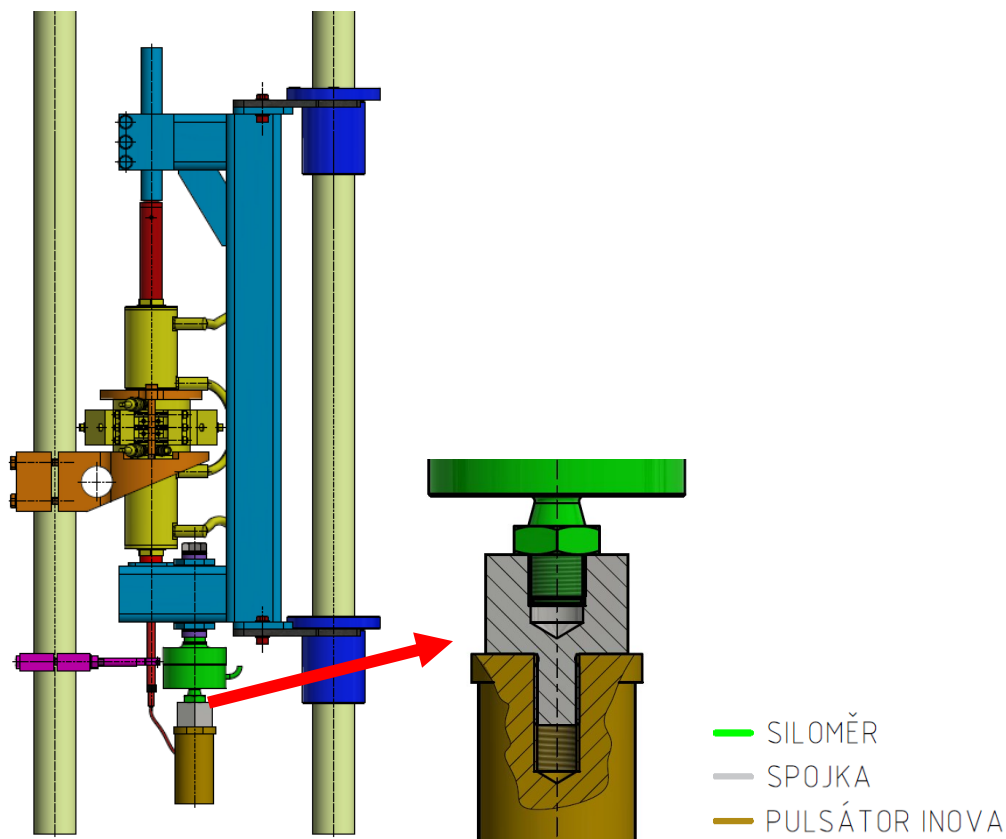
Dělené svěrné pouzdro na vodící tyč bylo vyrobeno z nerezového materiálu 1.4301 pomocí technologie vypalování z plechu. Vypálilo se jako jeden celek s přídatkem v díře pro vodící tyč. Kvůli přesnosti se tato díra totiž ještě upravovala na soustruhu. Následně se vyrobily díry a až jako poslední operace se svěrné pouzdro rozdělilo na dvě části.

Díky tomu, že tyč přesně lícuje s dírou v jedné půlce svěrného spoje, je zajištěna svislost osy snímače. Jeho polohu je možné jednoduše nastavit posunutím tyče, popřípadě pootočením celého držáku na vodící tyči. Toto řešení tak umožňuje jednoduše nastavit pozici snímače bez ohledu na montážní a výrobní nepřesnosti celé konstrukce.

Je však důležité, aby nedošlo k povolení stavěcího šroubu, který zajišťuje polohu tyče. Kdyby se povolil, mohlo by to vést ke zničení snímače kvůli kolizi s rámem pohonu. Jako pojistka sice bude sloužit spojení s plovoucím pístem, takže ani v případě povolení šroubu by pravděpodobně nemělo dojít k jeho pootočení a následnému poškození. Každopádně pro větší bezpečnost byl závit stavěcího šroubu pojištěn závitovým lepidlem.

5.5.2 Spojka siloměru s hydraulickým pulsátorem Inova

Jak již bylo zmíněno dříve, mezi siloměrem a hydraulickým pulsátorem Inova musí být použita spojka. Obě součásti totiž mají jiný připojovací závit. Obrázek 5-73 zobrazuje tuto spojku.



Obrázek 5-73 Spojení siloměru s hydraulickým pulsátorem Inova

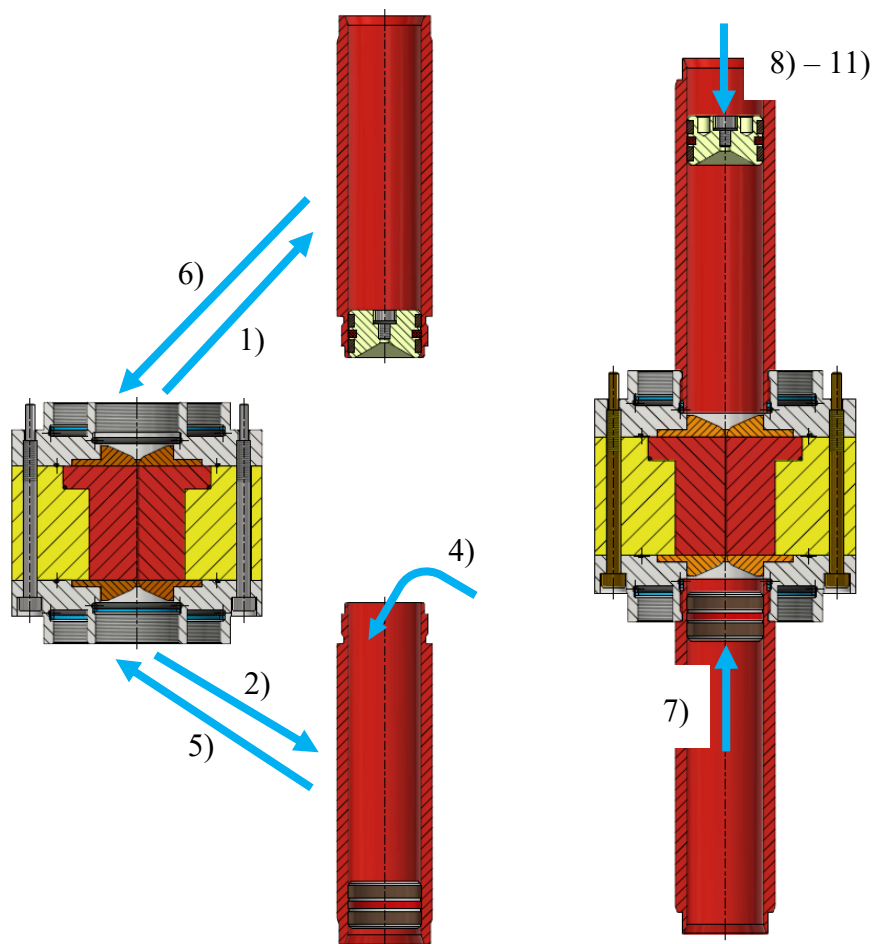
Konstrukce spojky je velmi jednoduchá. Je vyrobena z jednoho kusu materiálu a jako polotovar se použila šestihránná tyč tažená za studena. Díky tomu se zjednodušila její výroba, protože bude možné k povolování nebo k utahování použít standardní klíč bez potřeby materiál k tomuto účelu upravovat. Výroba spojky obsahovala pouze díru se závitem M20x1,5 a na druhé straně vnější závit M16.

Spojka se kontrolovala na dva stavy – během utahování a pak během provozu. Kompletní výpočet spojky byl proveden v příloze 12.5. Velikost předpětí byla zvolena na $F_i = 3 \text{ kN}$ a podle rovnice (12-84) je pro vyvození takového předpětí potřeba utahovací moment $M_u = 12 \text{ Nm}$. Na základě výpočtu v příloze 12.5.3 bylo určeno, že je nejvíce namáhaná právě během provozu. Bezpečnost k meznímu stavu únavy je podle rovnice (12-93) $k_{cu} = 1,13$. Minimální potřebná hloubka zašroubování závitu M16 je 14 mm. Při maximálním provozním zatížení nepřekročí tlak v závitu M20x1,5 dovolenou hodnotu – viz rovnice (12-95).

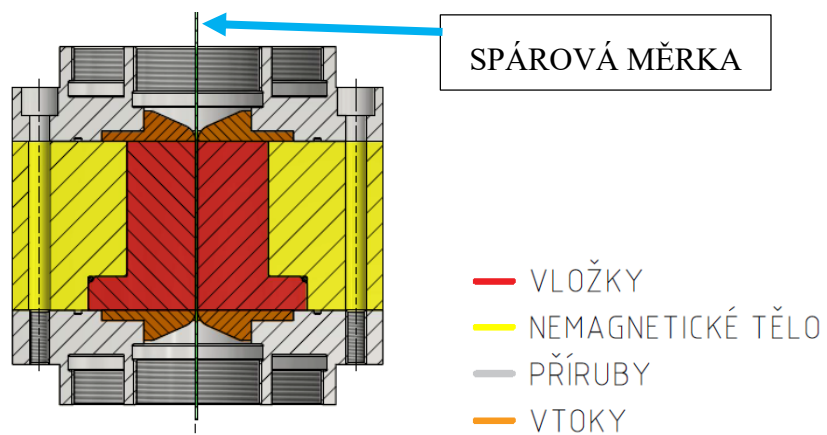
5.6 Přípravky k odvzdušňování reometru

Přípravky nutné k ulehčení prací během odvzdušňování reometru vznikly díky jednoduché konstrukci bez variant. Reometr se musí odvzdušnit vždy po výměně vzorku kapaliny. Proces jeho výměny se skládá z několika jednoduchých kroků. Obrázek 5-74 přehledně zobrazuje tyto kroky.

- 1) píst s odvzdušňovacím šroubem se stlačí až na doraz u příruby, válec s pístem se demontuje, kapalina se z příruby vyleje
- 2) demontuje se druhý válec, kapalina se z něj vyleje
- 3) vnitřní prostor reometru se vyčistí, aby nedošlo ke kontaminaci nového vzorku kapaliny tím starým
- 4) do válce s pístem bez odvzdušňovacího šroubu se naleje požadovaný objem kapaliny
- 5) na válec z bodu 4) se přišroubuje příruha (součástí je i nemagnetický/magnetický obvod s druhou přírubou – v případě výměny nemagnetického/magnetického obvodu se součásti rozloží a jejich vzájemná poloha po výměně se ustaví spárovými měrkami – viz Obrázek 5-75)
- 6) k celku se přišroubuje válec z bodu 1)
- 7) reometrem se protlačí kapalina z jednoho válce do druhého
- 8) protřepáním se vyženou bubliny v kapalině směrem k pístu s odvzdušňovacím šroubem
- 9) z pístu s odvzdušňovacím šroubem se odšroubuje tento šroub, aby mohl vzduch uniknout z vnitřního prostoru reometru
- 10) tento píst se následně tlačí až do okamžiku, kdy začne dírou se závitem pro šroub vytékat kapalina
- 11) odvzdušňovací šroub se nakonec dotáhne a reometr je připravený k měření



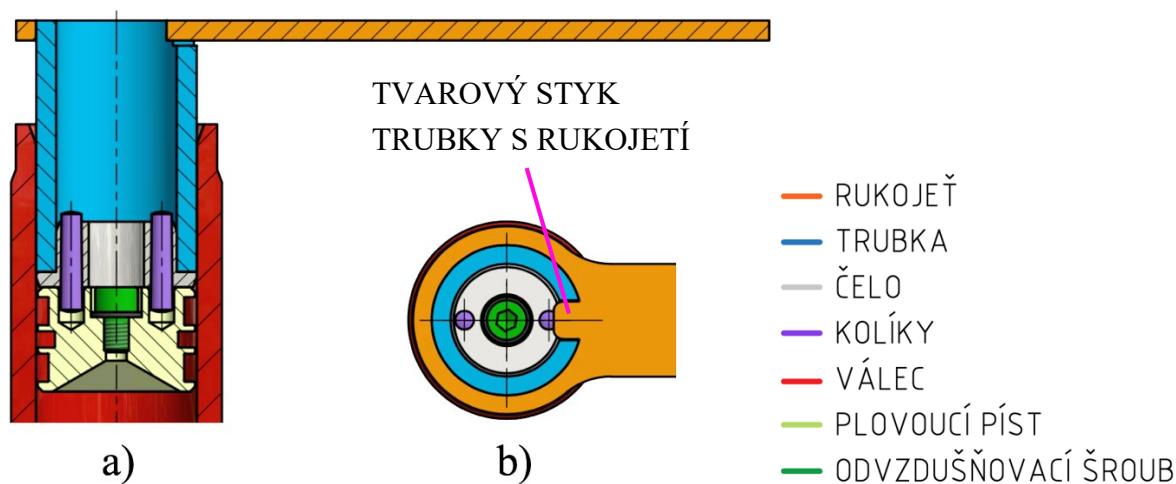
Obrázek 5-74 Proces odvzdušňování reometru



Obrázek 5-75 Ustavení polohy příruby a orientace vtoků pomocí spárové měrky

5.6.1 Přípravek pro držení plovoucího pístu

Tento přípravek je nutný pro povolování nebo dotahování odvzdušňovacího šroubu v plovoucím pístu. Brání totiž jeho otáčení ve válci. Konstrukce přípravku je velice jednoduchá a skládá se ze čtyř součástí – rukojeť, trubka a čelo trubky s kolíky (viz Obrázek 5-76). Plovoucí píst převzatý z předchozí evoluce slit-flow reometru byl kvůli tomuto přípravku upraven. Musely se do něj vyvrtat dvě díry, do kterých zapadnou kolíky a zajistí tak jeho polohu.



Obrázek 5-76 a) použití přípravku pro držení pístu; b) pohled na tvarový styk s rukojetí

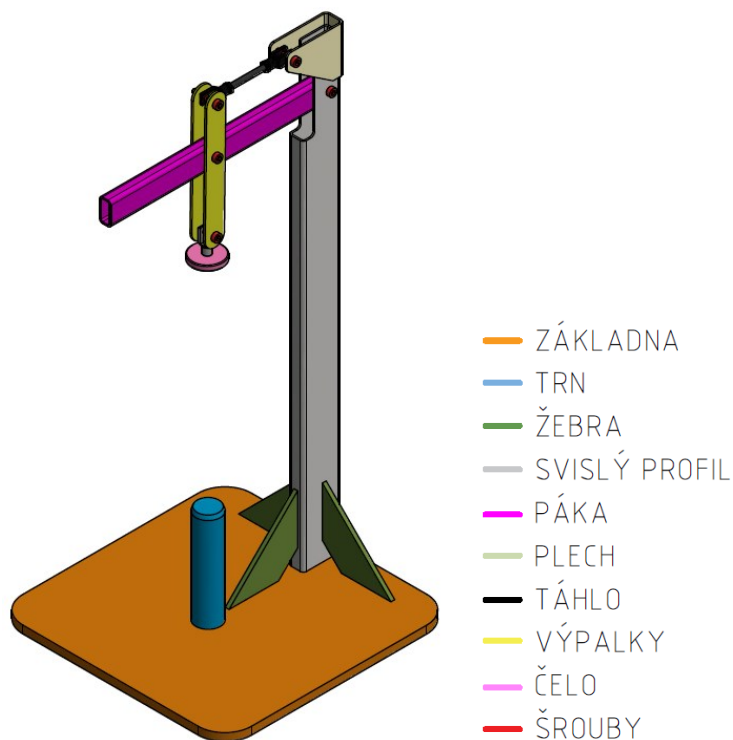
Rukojeť byla vypálena ze 4 mm tlustého nerezového plechu. Trubka je do ní pouze vložena, její zajištění v rukojeti je založeno pouze na velmi malé vůli mezi těmito součástmi. Aby nemohlo dojít k otáčení trubky v rukojeti, je její poloha zajištěna tvarovým stykem.

Trubka byla vyrobena z polotovaru s tolerancí vnějšího průměru f7. Díky tomu stačilo pouze polotovar nařezat na požadované délky a vyrobiť drážku pro tvarový styk s rukojetí. Díky tolerovanému vnějšímu průměru bude přípravek během používání přesně veden ve válci reometru. To je výhodné, protože poloha kolíků vůči díram v plovoucím pístu se bude nastavovat pouze otáčením přípravku. Trubka je vyrobena ve dvou délkách pro objemy kapaliny 100 – 70 ml a 70 – 30 ml.

V trubce bylo nalisováno čelo se dvěma kolíky. Tyto kolíky byly pak do čela také zalisovány. V čele mezi oběma kolíky je díra, aby bylo možné se s nástrojem dostat k odvzdušňovacímu šroubu.

5.6.2 Přípravek na protlačení kapaliny

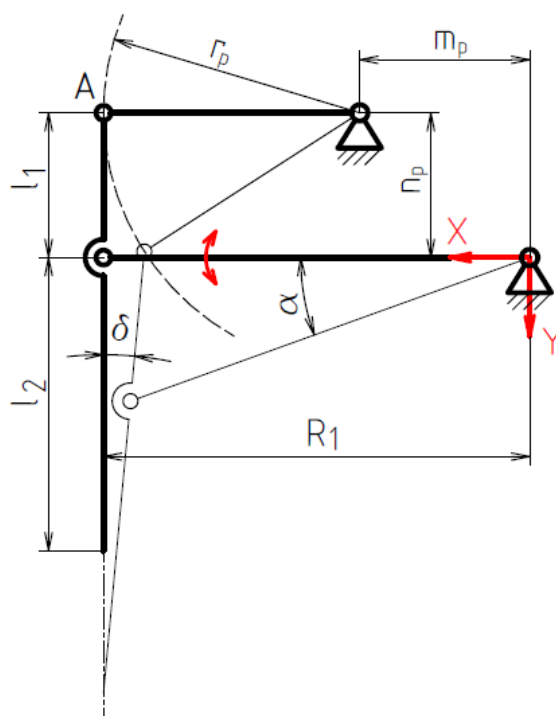
Tento přípravek byl navržen pro snadnější protlačení kapaliny v reometru během jeho odvzdušňování – viz úvod kapitoly 5.6. Jeho použití bude nezbytné v krocích 1), 7) a 10). V kroku 11) bude nutné pro tlačení plovoucího pístu použít ještě přípravek popsany v předchozí kapitole 5.6.1. Obrázek 5-77 zobrazuje celý přípravek na protlačení kapaliny.



Obrázek 5-77 Přípravek na protlačení kapaliny

Spodní část přípravku tvoří 10 mm tlustá základová deska, která zajišťuje jeho stabilitu. Na ní je upevněn trn, na který se reometr nasazuje. Trn přesně lícuje s válcem reometru a reometr je tak na něm během protlačení veden. Spojení trnu se základovou deskou je provedeno pomocí šroubu se zápustnou hlavou.

K základové desce je přivařen svislý profil, na kterém jsou zbývající prvky konstrukce. Geometrie horní části přípravku byla navržena tak, aby se čelo v celém zdvihu pohybovalo přesně v ose trnu. Díky tomu bude síla na reometr během protlačení působit vždy pouze ve svislém směru. Obrázek 5-78 zobrazuje kinematické schéma horní části přípravku, které bylo využito během výpočtů.



Obrázek 5-78 Kinematické schéma přípravku na protlačení

Při návrhu se vycházelo ze středové rovnice kružnice – viz rovnice (5-8). Cílem návrhu bylo získat co nejvhodnější rozměry jednotlivých částí mechanismu.

$$(x_p - m_p)^2 + (y_p - n_p)^2 = r_p^2 \quad (5-8)$$

kde x_p, y_p jsou souřadnice libovolného bodu na kružnici v m, m_p je posunutí středu kružnice ve směru osy x vůči souřadnému systému v m, n_p je posunutí středu kružnice ve směru osy y vůči souřadnému systému v m, r_p je poloměr kružnice v m.

V celém návrhu byla rozhodující poloha bodu A vůči počátku souřadného systému zvoleného v bodě otáčení páky – viz Obrázek 5-78. Jak je z obrázku patrné, tento bod se musí pohybovat po kružnici, aby návrh byl funkční. Pro popsání polohy tohoto bodu v závislosti na poloze páky byly odvozeny kinematické rovnice (5-9) a (5-10). Vztah mezi úhlem natočení páky α a úhlem natočení ramene δ vyjadřuje rovnice (5-11).

$$x_A = R_1 \cos \alpha - l_1 \sin \delta \quad (5-9)$$

$$y_A = R_1 \sin \alpha - l_1 \cos \delta \quad (5-10)$$

$$\sin \delta = \frac{R_1(1 - \cos \alpha)}{l_2} \quad (5-11)$$

kde x_A, y_A jsou souřadnice bodu A v m, R_1 je rameno páky v m a l_1, l_2 jsou ramena pohyblivé části mechanismu v m.

Poloměr R_1 byl při výpočtu prakticky dán – při vodorovné poloze páky musí osa trnu procházet kloubem mezi rozměry l_1 a l_2 . Zvolil se proto co nejmenší s ohledem na rozměry reometru, aby vzniklá páka během protlačování byla co největší. Podobně byl určen rozměr n_p . Ten musí být stejný, jako délka l_1 , aby bylo možné s mechanismem pohybovat rovnoměrně na obě strany. Cílem tohoto výpočtu je na základě uvedených rovnic navrhnout vhodné rozměry l_1 a l_2 .

Postupovalo se tak, že se pro daný poloměr R_1 volily rozměry l_1 a l_2 . Už na základě kinematického schéma je patrné, že rozměr l_2 musí být větší, než rozměr l_1 . Úhel natočení páky byl při výpočtu zvolen na dvě hodnoty 10° a 20° . Pro tyto dvě hodnoty se podle rovnic (5-9), (5-10) a (5-11) dopočítaly polohy bodu A vzhledem k zavedenému souřadnému systému. Tyto dvě souřadnice se následně dosadily do středové rovnice kružnice (viz rovnice (5-8)) a tak vznikla soustava dvou rovnic o dvou neznámých: m_p – poloha středu kružnice ve směru osy x a poloměr této kružnice r_p . Vzájemným podělením těchto dvou rovnic a jejich následnou úpravou se získala rovnice (5-12) pro určení neznámého parametru m_p . Pro výpočet potřebného poloměru kružnice již stačilo vybrat jednu polohu bodu A a dosadit ji do upravené středové rovnice kružnice – viz rovnice (5-13). Celý výpočet byl proveden iteračně, kdy se postupně měnily vstupní hodnoty pro získání nejlepšího výsledku.

$$m_p = \frac{(y_2 - l_1)^2 - (y_1 - l_1)^2 + x_1^2 - x_2^2}{2(x_2 - x_1)} \quad (5-12)$$

$$r_p = \sqrt{(x_1 - m_p)^2 + (y_1 - l_1)^2} \quad (5-13)$$

kde m_p je je posunutí středu kružnice ve směru osy x vůči souřadnému systému v m, l_1 je rameno pohyblivé části mechanismu v m, $x_{1,2}, y_{1,2}$ jsou souřadnice libovolného bodu v m a r_p je poloměr kružnice v m.

Byla snaha provést návrh tak, aby bylo táhlo upevněno přímo ve svislém profilu. To se nicméně nepodařilo vzhledem k zadaným rozměrům, proto je nutné mít v horní části profilu ještě plech, ve kterém je táhlo upevněno.

Délka páky byla zvolena taková, aby sílu přibližně zdvojnásobila. Její délka navíc ovlivňuje rozměry základové desky, přípravek se totiž během protlačení nesmí převrátit. Proto musí páka končit před hranou základové desky. Pokud by se velikost páky projevila jako nedostatečná, je možné přípravek dále upravit – např. použít delší páku a zároveň základovou desku přišroubovat ke stolu, aby se zabránilo převážení přípravku.

5.7 Kalibrace reometru

V téhle kapitole byly naplánovány počáteční měření s reometrem. Jejich cílem bylo získat závislost místních tlakových ztrát ve štěrbině o dané tloušťce na Reynoldsově čísle. Naměřená hodnota tlakového spádu p_{nam} se totiž skládá ze tří dílčích tlakových ztrát – viz rovnice (5-14).

$$\Delta p_{\text{nam}} = p_{\text{vi}} + p_{\text{m}} + p_{\text{p}} \quad (5-14)$$

kde Δp_{nam} je naměřená hodnota tlakového spádu v Pa, p_{vi} je přírůstek tlakového spádu od viskózního tření v Pa, p_{m} je přírůstek tlakového spádu od místních tlakových ztrát v Pa a p_{p} je přírůstek tlakového spádu od tvorby rychlostního profilu v Pa.

Pro určení vlastností měřené kapaliny je směrodatný pouze přírůstek tlakového spádu od viskózního tření p_{vi} . Zbylé přírůstky vznikly vlivem geometrie reometru a od naměřené hodnoty se musí odečíst. Jako místní tlakové ztráty jsou chápány především vtokové ztráty do štěrbin a výtokové ztráty z ní.

Aby bylo možné vhodně naplánovat kalibrační měření na reometru, bylo nejprve nutné znát rovnice popisující jednotlivé tlakové ztráty. Díky tomu bylo možné určit, jaké parametry mají největší vliv na velikost jednotlivých tlakových ztrát.

Na základě rešerše vyplynulo, že velikost místních tlakových ztrát (tzn. na vtoku do štěrbin a na výtoku z ní) nejvíce ovlivňuje rychlost proudění kapaliny – viz rovnice (5-15). Další vliv má ještě hustota kapaliny.

$$p_{\text{m}} = \rho \xi_{\text{v,l}} \frac{v_{\text{s}}^2}{2} \quad (5-15)$$

kde p_{m} je přírůstek tlakového spádu od místních tlakových ztrát v Pa, ξ_{m} je ztrátový součinitel místních ztrát, ρ je hustota kapaliny v kg/m³ a v_{s} je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s.

Tlaková ztráta pro oblast s vyvinutým rychlostním profilem byla odvozena v příloze 12.6.1 a výsledná rovnice pro tuto tlakovou ztrátu je rovnice (5-16). Je vidět, že střední rychlost proudění kapaliny ve štěrbině v_{s} nemá tak velký vliv, jako u místních tlakových ztrát. Místo hustoty má vliv viskozita.

$$\Delta p_{34} = \frac{12\eta v_{\text{s}} l_{34}}{h^2} \quad (5-16)$$

kde Δp je tlakový spád v Pa, h je tloušťka štěrbin slit-flow reometru v m, l_{34} je délka úseku 3-4, η je dynamická viskozita kapaliny v Pa.s a v_{s} je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s.

Pro oblast tvorby rychlostního profilu byla v příloze 12.6.2 odvozena rovnice (5-17). Největší vliv má opět střední rychlost kapaliny ve štěrbině v_s . Další vliv má hustota kapaliny a Reynoldsovo číslo, na kterém je závislý rozměr x_m .

$$\Delta p_{23} = \frac{0,6v_s^2 D_h^2 \rho}{h^2} [\ln(x_m + l_{stab}) - \ln x_m] \quad (5-17)$$

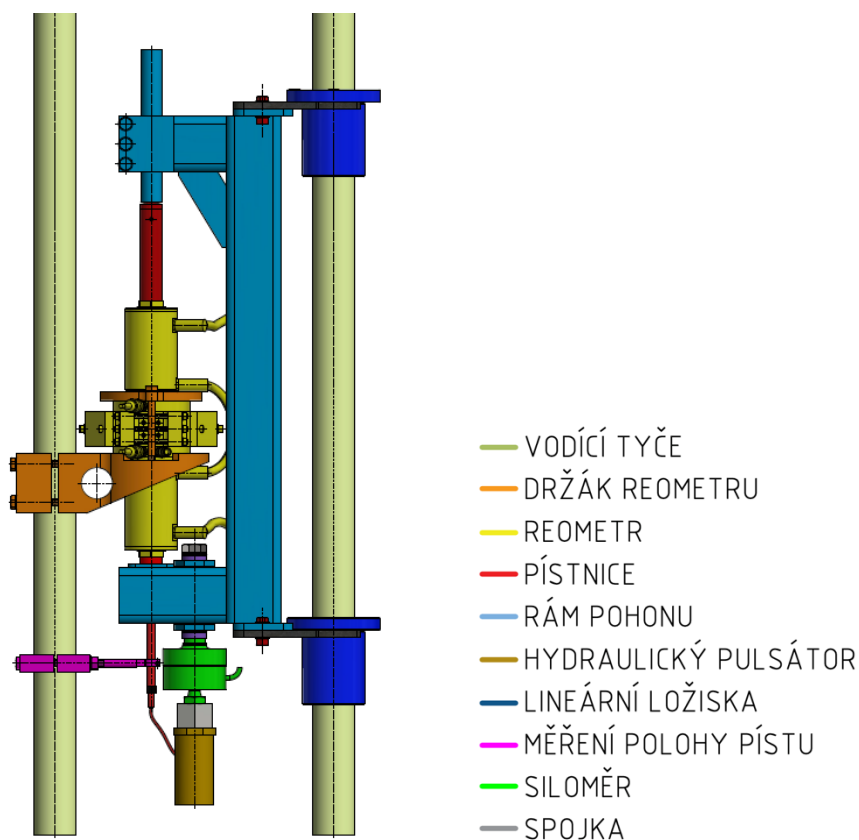
kde Δp je tlakový spád v Pa, h je tloušťka štěrbiny slit-flow reometru v m, v_s je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s, D_h je hydraulický průměr štěrbin v m, ρ je hustota kapaliny v kg/m³, x_m je vzdálenost od kraje štěrbin, ve které je vena-contracta v m a l_{stab} je stabilizační délka pro vytvoření rychlostního profilu v m.

Na základě uvedených vztahů se vytvořil plán měření. K měření se použila newtonská kapalina, u které byla přesně známa její dynamická viskozita a hustota. Prvních několik měření této kapaliny se provedlo ve velmi malých rychlostech, aby se co nejméně projevil vliv místních tlakových ztrát a také vliv od tvorby rychlostního profilu. Takto naměřená data se proloží přímkou a porovnají se s teoretickou tlakovou ztrátou od viskózního tření (viz rovnice (5-16)). Dále měření budou pokračovat s vyššími hodnotami proudění kapaliny, kde už se projeví vliv místních tlakových ztrát.

Vzhledem k závislostem jednotlivých ztrát je nejvýhodnější vyjádřit jejich velikost v závislosti na Reynoldsově čísle. Proto se provede další měření stejné kapaliny při jiné teplotě, aby se změnila její viskozita. Následovat bude ještě další měření s kapalinou o jiné hustotě, aby se mohla vytvořit požadovaná závislost. Naměřená data budou rozebrána v diskuzi v kapitole

6 DISKUZE

Hlavním cílem téhle práce bylo vyvinout čtvrtou evoluci slit-flow reometru pro magnetické i nemagnetické kapaliny, který dokáže měřit vlastnosti těchto kapalin při vysokých smykových spádech. Součástí vývoje byly i další nezbytné prvky, které se vyvíjeli na rám hydraulického pulsátoru Inova – viz Obrázek 6-1. Reometr poskytuje lepší uživatelskou přívětivost a díky tomu, že je možné měnit parametry štěrbiny (drsnot stěn, materiál stěn, tloušťka a délka štěrbiny), rozšiřuje i možnosti výzkumu. Reometr byl kompletně vyvinutý a vyrobený včetně dalších potřebných součástí, jako např. jeho držák, rám pohonu nebo potřebné přípravky pro odvzdušňování. Výstupem této práce je funkční vzorek.



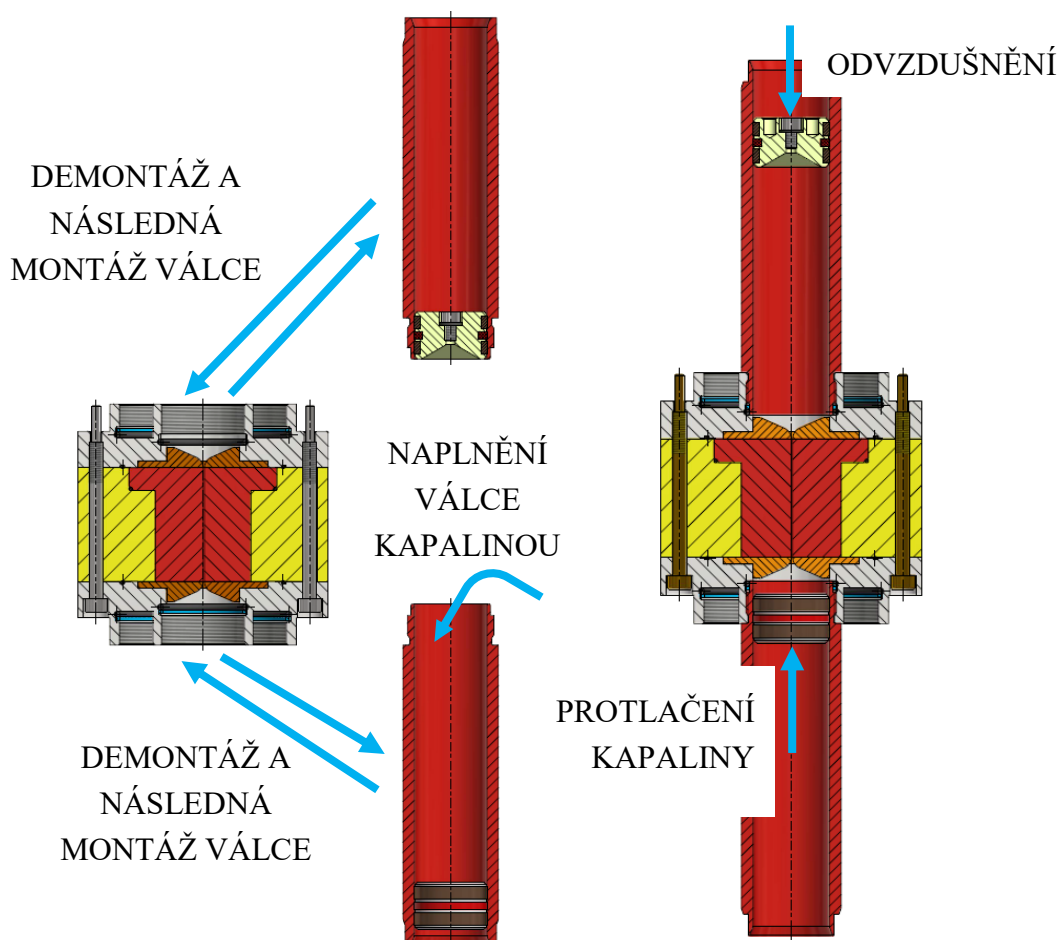
Obrázek 6-1 Vyvinutá konstrukce

Součásti se vyráběly ve firmách a jejich část se vyráběla i ve školní dílně. Cena za práci ve firmách se pohybuje kolem cca 60 000 Kč. Ve školní dílně pracuje zaměstnanec Ústavu konstruování a na výrobě strávil cca 70 hodin. Fotodokumentace všech částí konstrukce je v externích přílohách téhle práce.

6.1 Výměna vzorku kapaliny, skládání a odvzdušňování reometru

Při návrhu jednotlivých částí reometru byla snaha co nejvíce zjednodušit jeho konstrukci, aby se urychlil a zjednodušil proces výměny vzorku kapaliny. Při tomto procesu se totiž musí demontovat některé části reometru. Vždy se musí demontovat oba válce a pokud je na reometru i temperační obvod, musí se demontovat i válce temperačního obvodu. Proces výměny vzorku byl přehledně popsán v úvodu kapitoly 5.6 a přehledné zobrazení hlavních kroků poskytuje Obrázek 6-2. Doba výměny vzorku kapaliny netrvá dlouho a u vyvinutého reometru se pohybuje řádově v minutách.

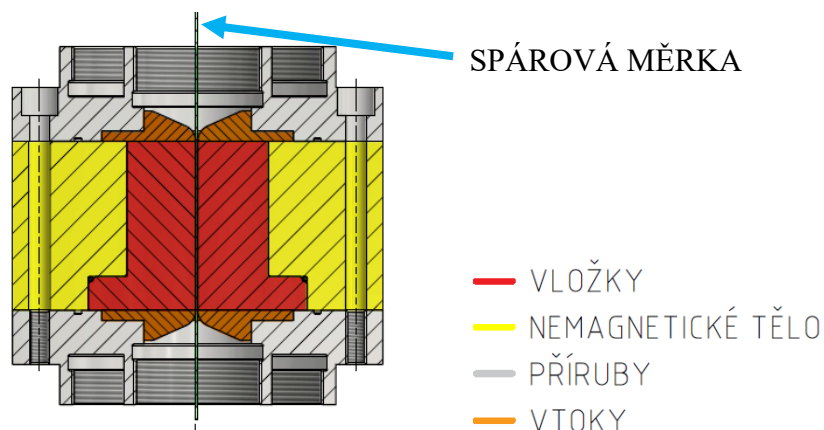
Konstrukce reometru umožňuje provést výměnu vzorku kapaliny téměř bez potřeby nástrojů. Jak válce, tak i temperační obvod je totiž možné demontovat pouze pomocí ruky. K výměně vzorku kapaliny není potřeba víc rozdělovat reometr. Jediný nezbytný nástroj je pro práci s odvzdušňovacím šroubem na plovoucím pístu.



Obrázek 6-2 Vlevo: rozložení reometru, vpravo: proces odvzdušňování reometru

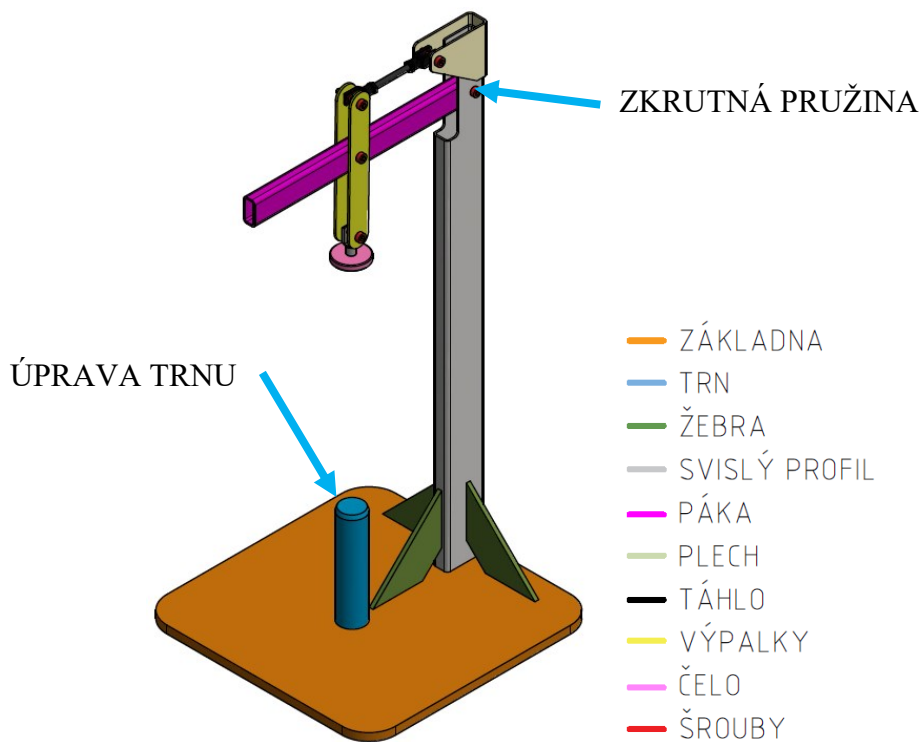
Při výměně magnetického obvodu za nemagnetický (nebo opačně) je proces mírně komplikovanější. Musí se navíc ještě povolit čtyři šrouby, které drží reometr pohromadě. V tomto okamžiku je celý reometr rozložený. Na celém reometru (včetně magnetického obvodu) jsou použity šrouby M6 stejného typu, proto bude stačit pouze jeden nástroj.

Během skládání reometru se ustavování polohy přírub vůči šterbině pomocí spárové měrky se ukázalo jako jednoduché, rychlé a přesné řešení – viz Obrázek 6-3. Tento postup je proto možné dále používat a není potřeba používat navrhované kolíky pro ustavení polohy vtoků, popř. vložek nemagnetického těla.



Obrázek 6-3 Ustavení polohy příruby a orientace vtoků pomocí spárové měrky

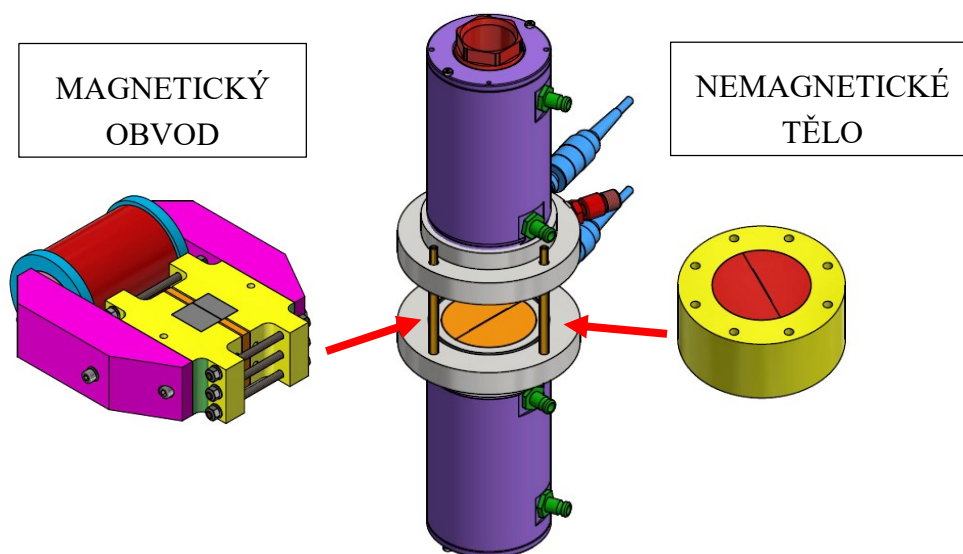
Přípravky určené ke zjednodušení a zrychlení procesu odvzdušňování reometru dobře plní svou funkci. Do rukojeti přípravku na protlačení kapaliny byla pouze přidána zkrutná pružina, aby ji držela v horní poloze – viz Obrázek 6-4. Rukojeť díky tomu nepřekáží při manipulaci s reometrem. Jediným problémovým místem na přípravku k protlačení plovoucích pístů byl jeho trn, který moc přesně lícoval s válcem reometru. Kvůli tomu nemohl vzduch uniknout z uzavřeného prostoru válce při vyjímání reometru. Tento trn se proto upravil, aby byla vůle mezi ním a válcem větší.



Obrázek 6-4 Přípravek na protlačení kapaliny

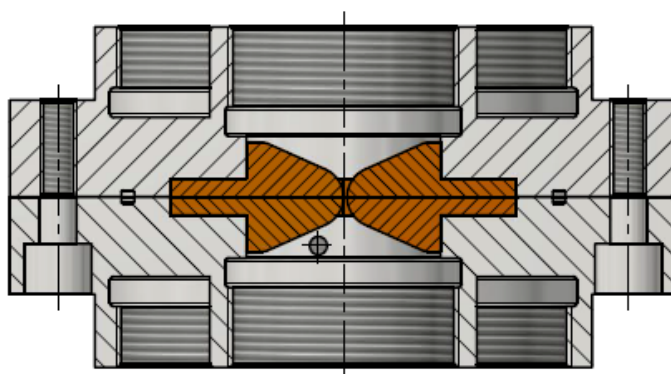
6.2 Možnosti reometru

Reometr poskytuje široký prostor k úpravám podle potřeby, což rozšiřuje možnosti výzkumu. Pro MR kapaliny byl vyvinut magnetický obvod s výměnnými vložkami a pro ostatní kapaliny bylo vyvinuto nemagnetické tělo s výměnnými vložkami – viz Obrázek 6-5. Významným prvkem jsou výměnné vložky tvořící šterbinu, které navíc umožňují jednoduchou a rychlou výměnu v případě jejich opotřebení. Nebude potřeba vyrábět celé tělo znovu. Díky konstrukci reometru je možné používat i jiné délky šterbiny.



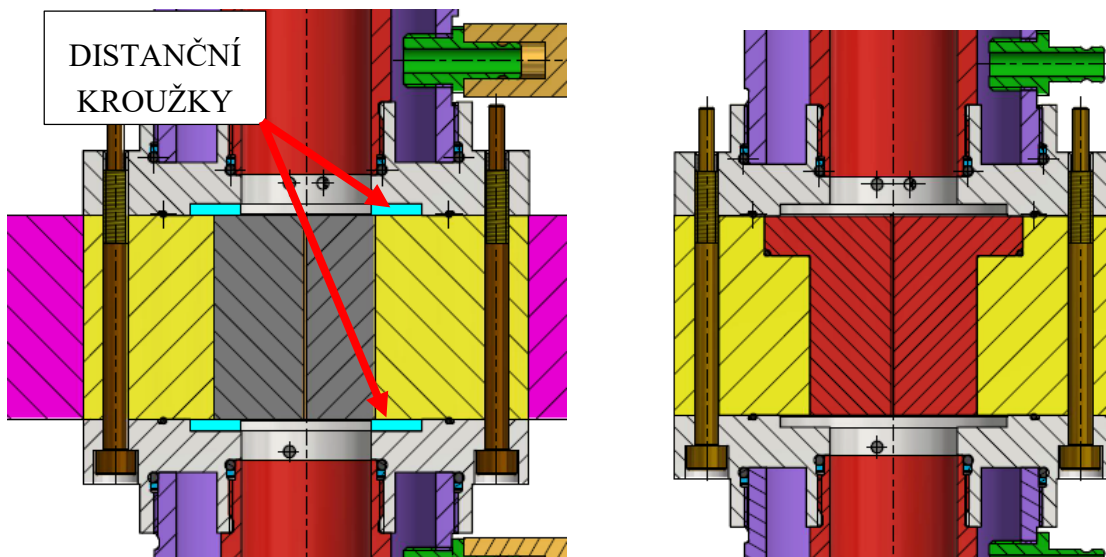
Obrázek 6-5 Základní dvě konfigurace vyvinutého slit-flow reometru

V extrémním případě je možné vyvinutý reometr složit bez štěrbin, pouze přírubu na přírubu s vtoky – viz Obrázek 6-6. To může v budoucnu pomoci lépe určit velikost místních ztrát s použitými vtoky, které je zmenšují.



Obrázek 6-6 Možnost složit vyvinutý reometr bez štěrbin, pouze s vtoky

Měření je možné provádět i bez vtoků při maximálních vtokových ztrátách – viz Obrázek 6-7. V případě měření s magnetickým obvodem bude ale nutné do zahloubení v přírubách vložit distanční kroužky, aby se o ně mohly opřít vložky magnetického obvodu. V případě měření bez vtoků u nemagnetického těla nejsou distanční kroužky nutné. Při měření bez vtoků nebudou mít plovoucí písty dorazy, proto se bude muset dbát zvýšené pozornosti při nastavování rozsahu pohybu lineárního aktuátoru, aby plovoucí píst nepřejížděl přes hranu mezi valem a přírubou. To by mohlo způsobit poškození jeho těsnění.



Obrázek 6-7 Reometr bez vtoků; vlevo: magnetický obvod, vpravo: nemagnetické tělo

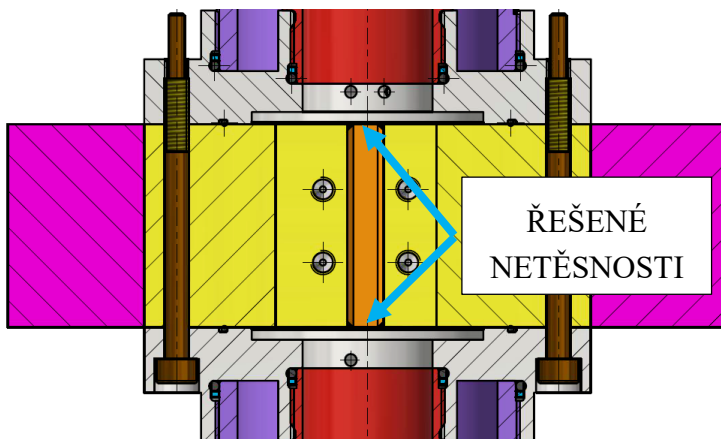
Použitelný objem kapaliny v reometru se pohybuje v intervalu 30 – 100 ml. Interval platí jak pro nemagnetické tělo, tak pro magnetický obvod. Rám pohonu reometru spolu s jeho držákem se dokáží jednoduše přizpůsobit různým objemům kapaliny i jiným délkám štěrby.

6.3 Magnetický obvod

Výroba magnetického obvodu proběhla částečně ve firmě a částečně ve školní dílně. Byl vyroben z magneticky měkkého materiálu. Při výrobě ve firmě nebyla na jedné součásti dodržena jedna geometrická tolerance udávající přesnost štěrby, proto se součást vrátila na opravu. Kompletní fotografická dokumentace magnetického obvodu je v externích přílohách téhle práce.

K utěsnění magnetického obvodu bylo použito plošné těsnění Loctite MR 5922 a těsnost byla následně ověřena tlakovou zkouškou. Obrázek 6-8 vlevo znázorňuje tuto tlakovou zkoušku. Použil se při ní ruční lis, pomocí kterého se v reometru vytvořil tlak. Tlakoměry byly nahrazeny zátkami, aby nemohlo dojít k jejich přetížení a následnému zničení.

Během tlakové zkoušky se objevily netěsnosti pouze v místech u distancí (viz Obrázek 6-8 vpravo). Proto v těchto místech bylo vyzkoušeno více těsnících hmot a jako nejlepší řešení se projevila kombinace plošného těsnění Loctite MR 5922 spolu s tmelem. Tato kombinace zajistila těsnost při tlakové zkoušce.



Obrázek 6-8 *Vlevo: tlaková zkouška, vpravo: místa netěsností*

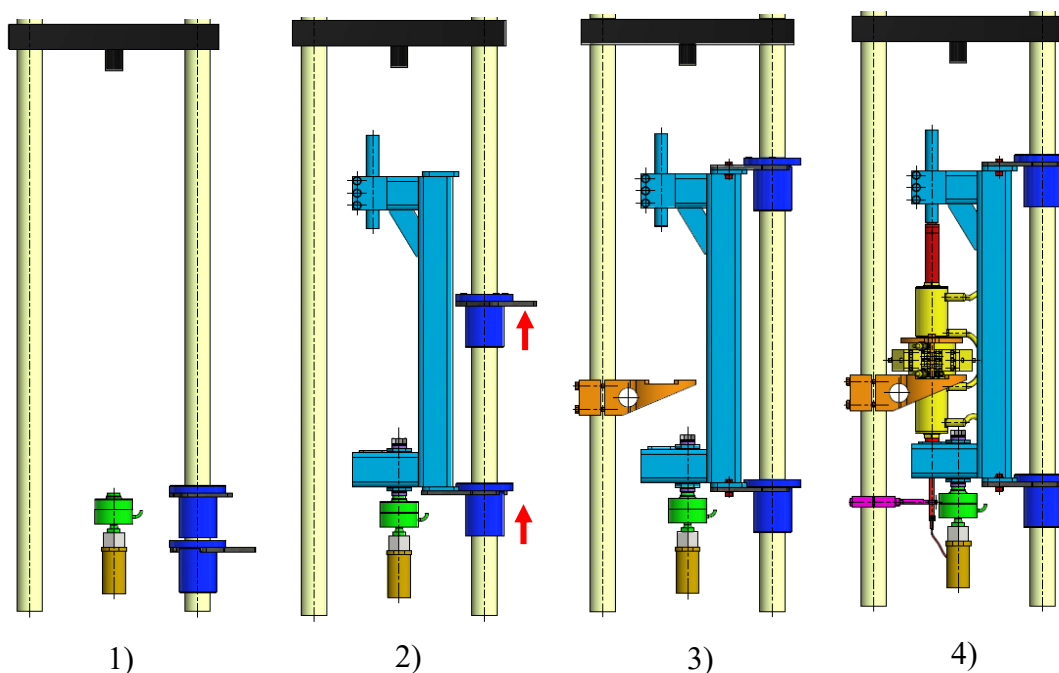
Po složení magnetického obvodu provedl pan Ing. Michal Kubík, Ph.D. kontrolní měření pro získání B-H křivky v prostoru štěrbiny (závislost velikosti magnetické indukce na intenzitě magnetického pole). Během tohoto měření se zjistily dvě věci. Vlivem magnetické síly se obě vložky k sobě posunuly. Polohu těchto vložek zajišťovaly pouze stavěcí šrouby. Kvůli velkým magnetickým silám proto byly tyto stavěcí šrouby vyměněny za stavěcí šrouby s hrotem, který se do obou vložek po utažení vtlačil. To vyřešilo problém s posouváním vložek. Druhá věc na magnetickém obvodu je, že udržuje zbytkový magnetismus. Jedná se přibližně o 20% rozsahu. I když byl magnetický obvod vyroben z behanitu, pravděpodobně došlo vlivem obrábění ke změně jeho magnetických vlastností. Dodatečné žihání magnetického obvodu by mělo vyřešit udržování zbytkového magnetismu.

6.4 Montáž na rám hydraulického pulsátoru Inova

Proces montáže držáku reometru a rámu jeho pohonu na rám hydraulického pulsátoru Inova je poměrně jednoduchý a pohodlně jej zvládne jedna osoba. Obrázek 6-9 zobrazuje tento postup, který je možné provést v následujících krocích:

1. siloměr se přes spojku spojí s hydraulickým pulsátorem Inova
2. rám pohonu se pomocí šroubu spojí se siloměrem, horním lineárním ložiskem se vyjede do požadované polohy a pomocí výpalků se spojí, stejným způsobem se spojí i spodní lineární ložisko s rámem pohonu
3. ustaví se rovina pomocí dosedacích ploch na výpalcích a dotáhne se šroub spojující rám pohonu s lineárním aktuátorem, připojí se držák reometru

- do držáku se vloží reometr s pístnicemi, zajistí se výpalkem a nastaví se poloha držáku vůči rámu pohonu, připojí se snímač polohy plovoucího pístu

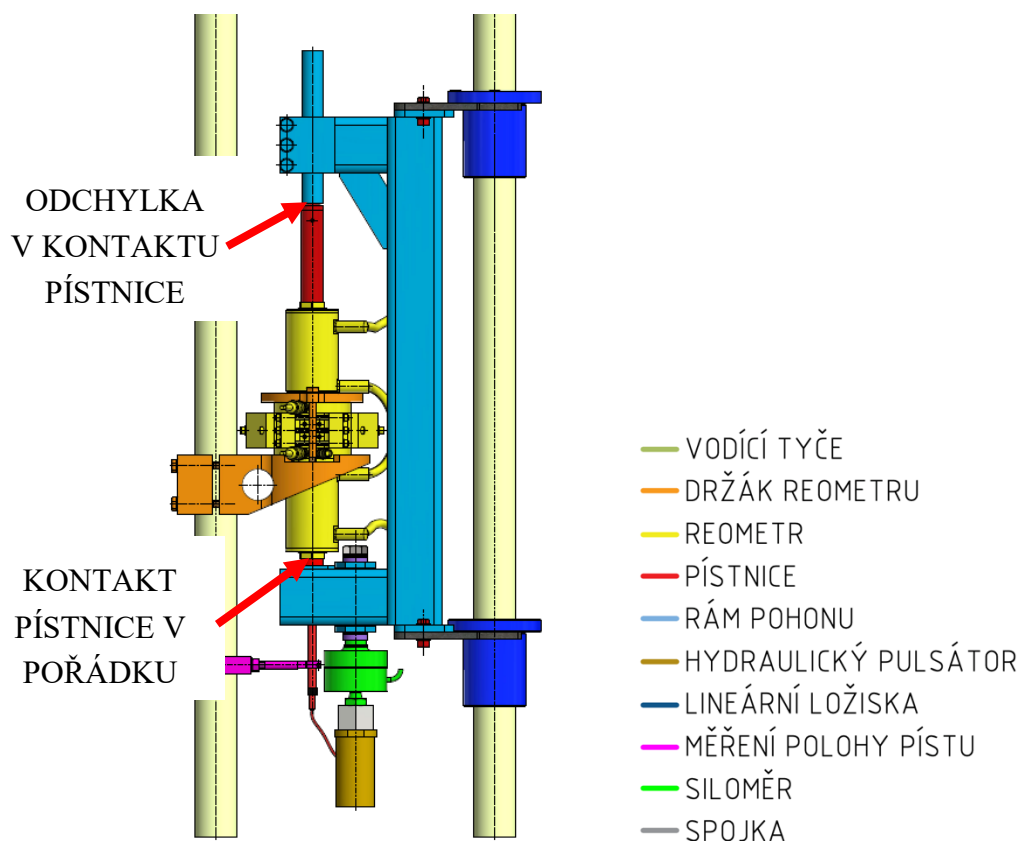


Obrázek 6-9 Postup montáže konstrukce na rám hydraulického pulsátoru Inova

Díky navržené koncepci je zde dostatek místa pro manipulaci s reometrem a jeho zajištění pomocí dvou šroubů je velmi jednoduché a rychlé. Na držáku i rámu pohonu byl použit stejný typ šroubů se závitem M10, takže pro montáž i demontáž těchto prvků bude stačit jeden nástroj.

Díky tomu, že mezi rámem pohonu a pístnicemi není pevná vazba, je vkládání reometru do držáku výrazně jednodušší v porovnání se třetí evolucí slit-flow reometru. Po montáži se analyzoval kontakt obou pístnic s rámem pohonu.

Spodní pístnice dosedá na rám pohonu celou svou čelní plochou, v kontaktu horní pístnice ale byla odchylka – viz Obrázek 6-10. Tato odchylka je způsobena výrobní nepřesností rámu pohonu, byla totiž přítomna i po přesném ustavení jeho polohy. Vliv této odchylky byl nejvíce viditelný na konci zdvihu po odlehčení tyče, kdy se konstrukce viditelně zachvěla. Tuto odchylku bylo tedy nutné řešit.



Obrázek 6-10 Vyvinutá konstrukce

Horní pístnice se proto upravila, aby mezi ní a dosedací plochou byl pouze bodový kontakt. Tato úprava byla velmi jednoduchá, pouze se do pístnice nalisovalo čelo s požadovanou geometrií – viz Obrázek 6-11.



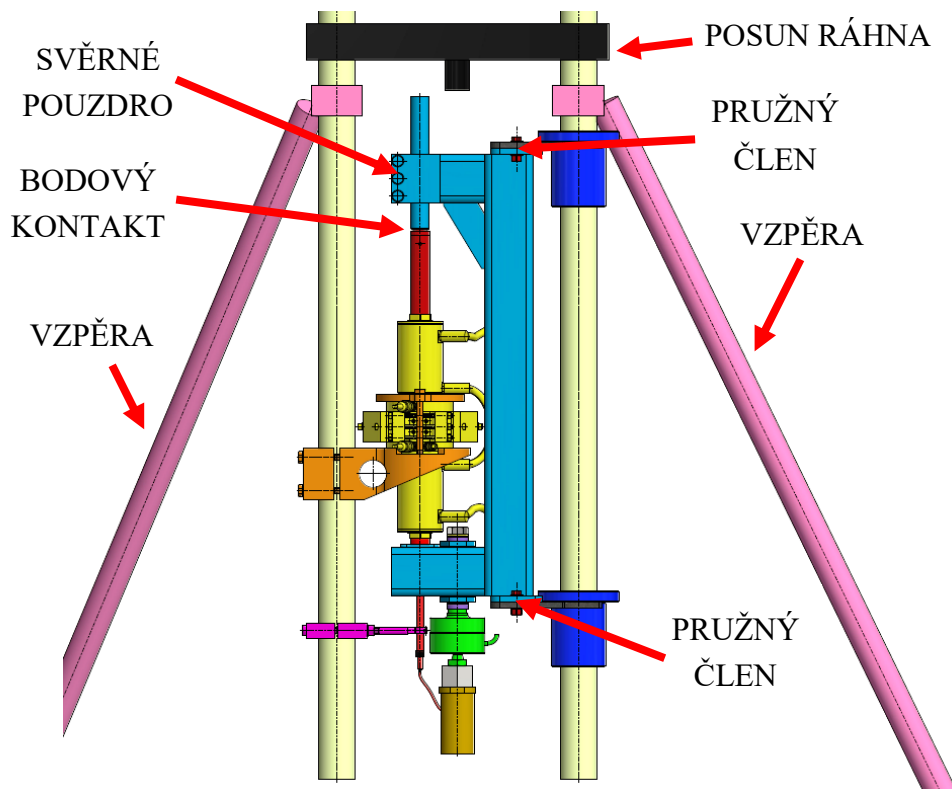
Obrázek 6-11 Pístnice upravená pro bodový kontakt

Aby mohl unikat vzduch z prostoru válce během nasazování nebo vytahování pístnice, bylo do ní nutné vyvrtat ještě díru. Její poloha byla určena tak, aby se nedostala do kontaktu se stěnou válce, který by mohla poškrábat. Takto upravená pístnice problém vyřešila.

6.5 Měření

Ještě před tím, než se prováděly kalibrační měření, se vyzkoušelo chování celého zařízení. Zjistilo se, že při sinusovém signálu, amplitudě ± 40 mm a frekvenci 1,6 Hz začnou vibrovat vodící tyče a kvůli tomu se lineární ložisko začne zadírat. Frekvence 1,6 Hz při zdvihu ± 40 mm odpovídá rychlosti pístu 0,4 m/s a v nemagnetické šterbině o průřezu 32 x 0,6 mm kapalina proudí střední rychlostí 16,8 m/s.

Aby se tento jev co nejvíce omezil, zavedly se některé úpravy – viz Obrázek 6-12. Tou první je zkrácení tyče ve svěrném pouzdru rámu pohonu reometru. Díky tomu bylo možné posunout níž ráhno spojující obě vodící tyče. Významnou úpravou je možnost na vodící tyče přidat vzpěry, které se upevňují k zemi a s vodícími tyčemi je spojuje svěrné pouzdro. Tyto vzpěry mají velký vliv na tuhost a na chování systému. Dále se přidaly pružné členy mezi spojení lineárního ložiska s rámem pohonu. Zavedené změny chování zlepšily, ale nevyřešily problém úplně.



Obrázek 6-12 Zavedené úpravy na konstrukci

Měření probíhala bez snímače polohy plovoucího pístu. Řídicí signál byl sinusový, proto v půlce zdvihu byla největší rychlost, největší tlakový spád a zároveň nulové zrychlení. Na základě zvolené frekvence a amplitudy je možné dopočítat maximální rychlost – viz rovnice (6-1).

$$v_{\max} = x_A 2\pi f \quad (6-1)$$

kde v_{\max} je maximální rychlost pístu v m/s, x_A je amplituda v m a f je frekvence v Hz.

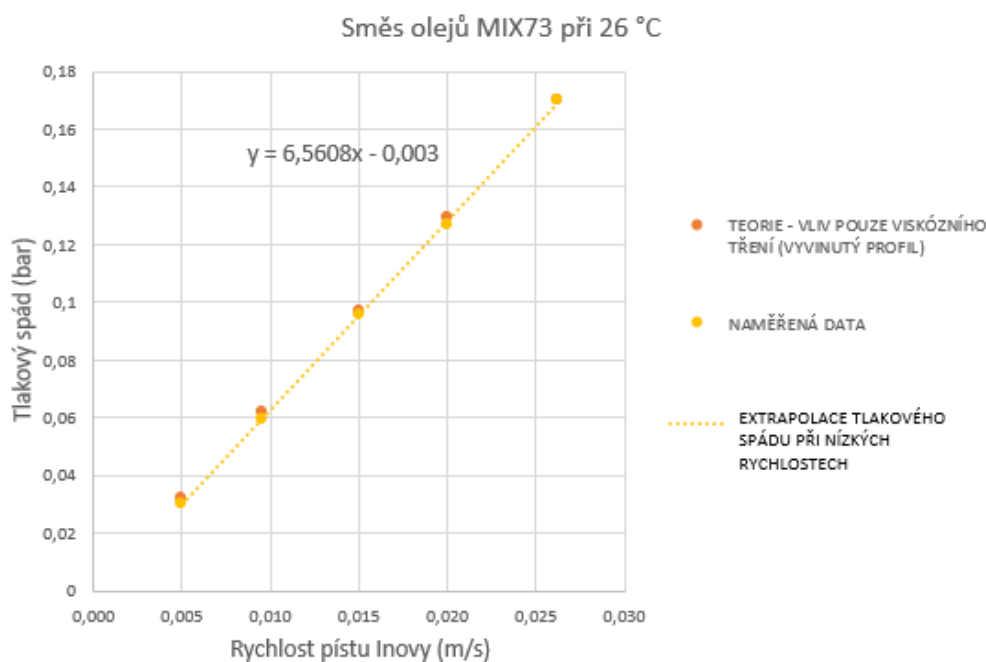
Dále by bylo vhodné snížit tuhost svěrného pouzdra v horní části rámu pohonu – viz Obrázek 6-12. Během utahování šroubů je totiž potřeba šrouby relativně silně dotáhnout, aby vůbec došlo k sevření tyče. Vhodná úprava může být na základě strukturální analýzy provedena nařiznutím nebo navrtáním svěrného pouzdra.

6.5.1 Naměřená data

Jak již bylo popsáno v kapitole 5.7, kalibrační měření proběhla na kapalině, u které byla přesně známa její viskozita pro různé teploty a hustota. Tato kapalina je směs dvou olejů: 73,16 hm% OL-J3 a 26,84 hm% OL-J32. Viskozita této směsi byla v rámci jiné probíhající diplomové práce přesně změřena na viskozimetru pro různé teploty. Jelikož se jedná o newtonskou kapalinu, bylo možné tato data použít i pro porovnání měření na reometru. K měření se použila nemagnetická štěrbiná.

Měření probíhala při dvou různých teplotách se zvolenými rychlostmi pístu hydraulického pulsátoru Inova. Díky změně teploty se výrazně změnila i viskozita dané kapaliny. Podle plánu měření se nejprve udělalo 5 měření při velmi nízkých rychlostech, aby se projevil dominantní vliv viskózního tření kapaliny ve štěrbině. Stejným způsobem se změřila ještě jiná newtonská kapalina, aby se při vyčíslení součinitele místních ztrát mohla určit i závislost na hustotě kapaliny.

Body měřené ve velmi malých rychlostech se použily k proložení přímkou a k následnému porovnání s teoretickými hodnotami – viz Obrázek 6-13. Pro další měření je průběh stejný a grafické znázornění je v externí příloze E2.



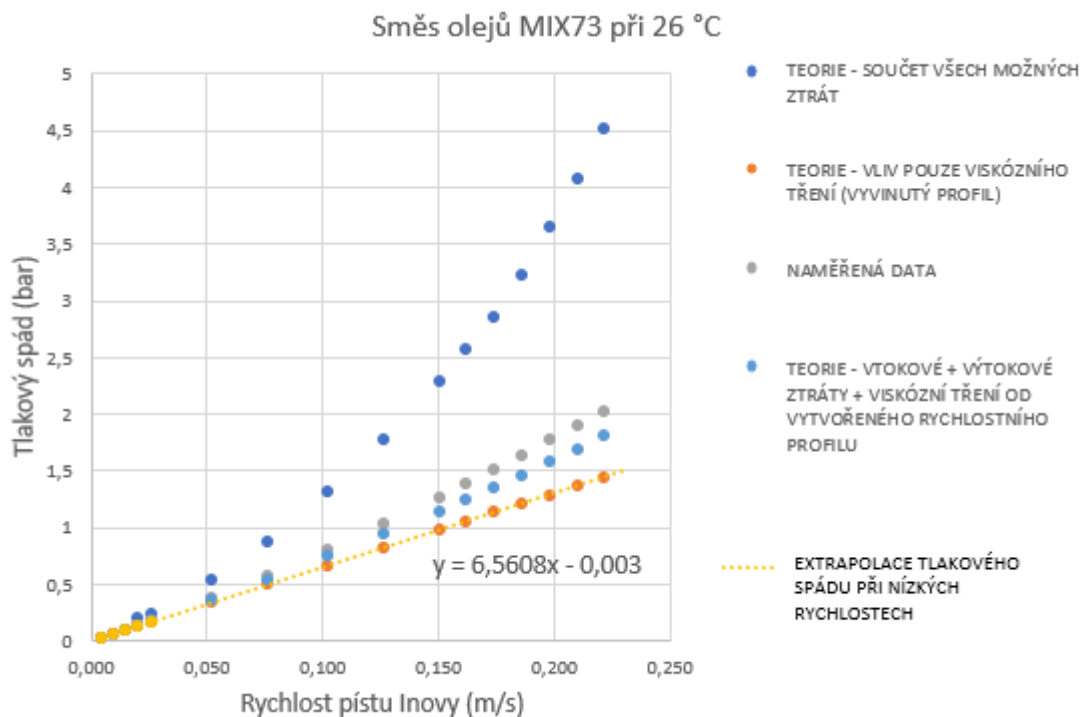
Obrázek 6-13 Porovnání teoretických tlakových spádů s těmi naměřenými

Při měření v tak malých rychlostech jsou ale v reometru velmi malé tlaky a je proto důležité použít snímače s menším rozsahem pro snížení vlivu šumu a pro zvýšení přesnosti měření. Použité tlakoměry HBM P8AP mají přesnost měření 0,3 % z rozsahu. Tabulka 6-1 zobrazuje tlakový spád naměřený pro stejnou kapalinu při stejných podmínkách s 100 bar tlakoměry a s 10 bar tlakoměry. Jak je vidět, tak rozdíl mezi snímači je velký. Všechna měření jsou vyhodnocena v externí příloze E2.

Tabulka 6-1 Rozdíl v tlakovém spádu v závislosti na použitém tlakoměru

Rychlost pístu (mm/s)	Tlakový spád – 10 bar tlakoměry (bar)	Tlakový spád – 100 bar tlakoměry (bar)	Rozdíl (%)
5	0,030	0,039	29,8
10	0,060	0,077	28,4
20	0,127	0,148	16,7
26	0,170	0,189	11,3

Obrázek 6-14 zobrazuje závislost tlakového spádu na rychlosti pístu. S naměřenými daty se porovnávalo několik teoretických přístupů výpočtu tlakového spádu. Největší nepřesnosti se dosáhlo při uvažování všech teoretických tlakových ztrát, tzn. vtokové, výtokové, od tvorby rychlostního profilu a od viskózního tření při plně vyvinutém rychlostním profilu. Naopak nejbližší shodu s naměřenými daty poskytuje součet všech teoretických tlakových ztrát bez uvažování oblasti tvorby rychlostního profilu. To znamená, že tato oblast nemá tak výrazný vliv, jak předpokládala teorie, což je pro měření žádoucí. Teorie také předpokládá vývin rychlostního profilu z pístového profilu, po vstupu kapaliny do štěrbin za oblastí vena contracta ale nemusí být přítomen 100% pístový profil.



Obrázek 6-14 Tlakový spád při měření směsi olejů MIX73 na vyvinutém reometru

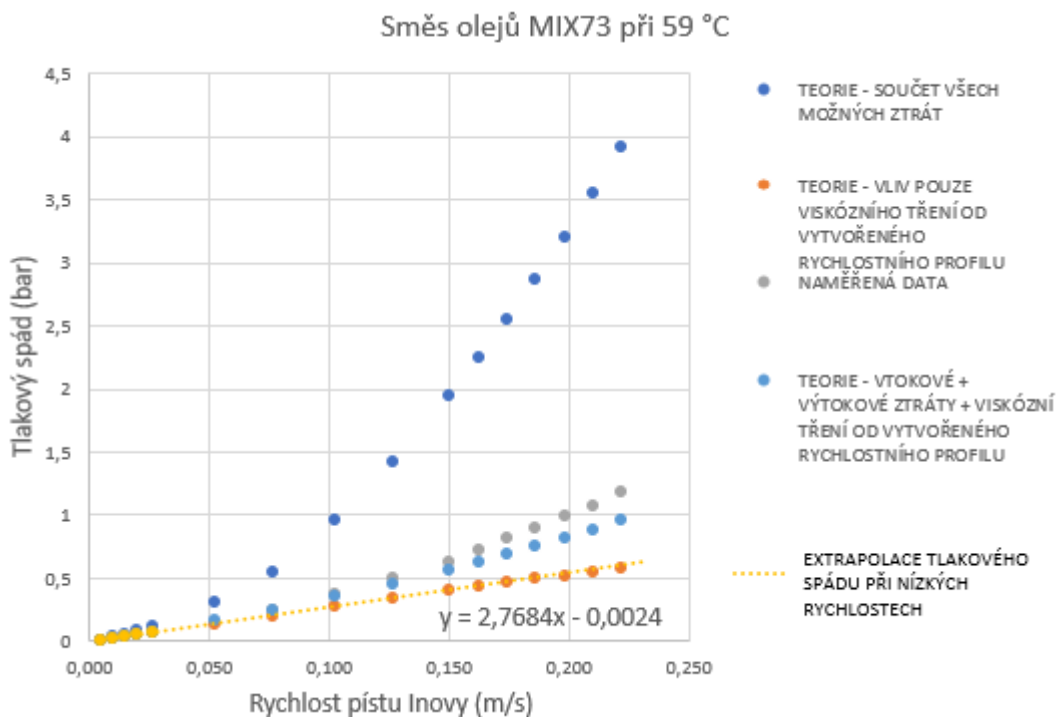
Na základě naměřených dat je také vidět (viz Obrázek 6-14), že lineární proložení pěti bodů měřených ve velmi nízkých rychlostech přesně odpovídá teoretickému tlakovému spádu pouze od viskózního tření při plně vyvinutém rychlostním profilu. To dokazuje, že v těchto nízkých rychlostech je skutečně dominantní vliv pouze od viskózního tření a proto je u newtonských kapalin možné rovnou na základě těchto dat určit dynamickou viskozitu zkoumané kapaliny – viz rovnice (6-2):

$$\eta = \frac{\Delta p_{\text{nam}} h^2}{12 v_p l} \quad (6-2)$$

kde η je dynamická viskozita kapaliny v Pa.s, Δp_{nam} je naměřený tlakový spád v Pa, h je tloušťka štěrbin slit-flow reometru v m, l je délka štěrbiny a v_p je rychlost pístu v m/s.

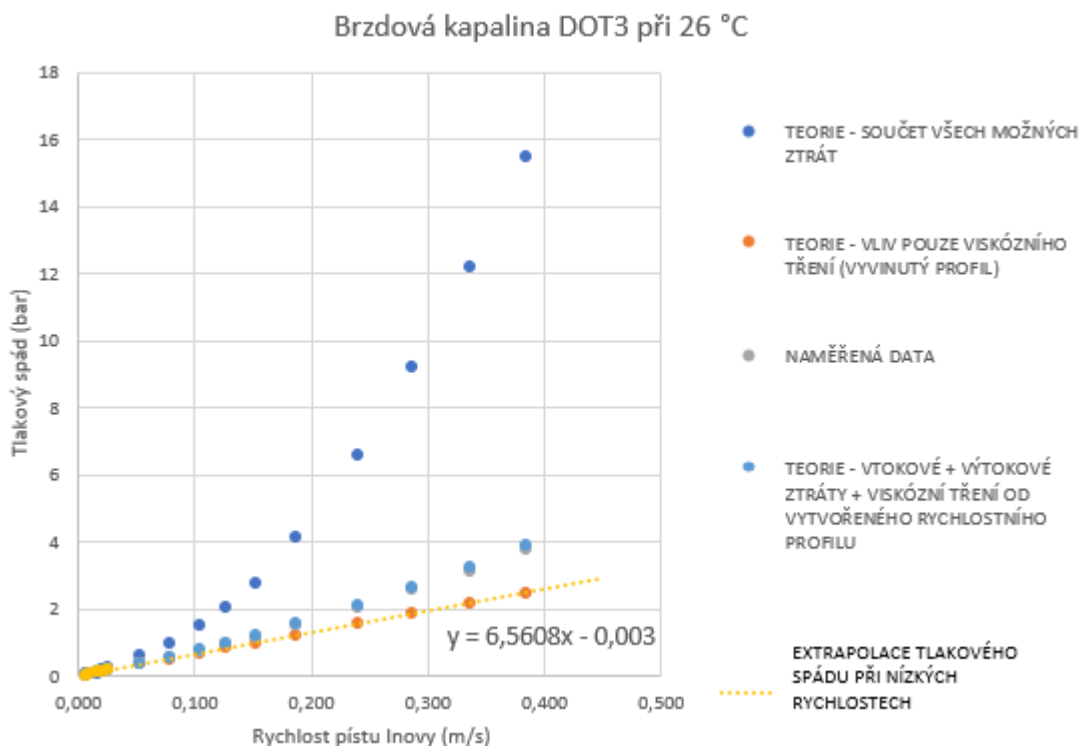
Během měření stejné kapaliny při vyšší teplotě byl otestován temperační obvod. Lila se do něj horká voda, aby se kapalina zahřála na požadovanou teplotu. Během testování se neobjevil žádný problém a ověřila se jednoduchá obsluha pomocí rychlospojek. V budoucnu bude u reometru uzavřený temperační okruh s nucenou cirkulací média.

Ohřívání kapaliny ovlivnilo snímání tlakoměrů, každý měl posunutou hodnotu nulového tlaku. Proto se při vyhodnocení musely hodnoty srovnat pomocí offsetu. Obrázek 6-15 zobrazuje porovnání naměřených dat s různými teoretickými přístupy. Platí zde stejné závěry, jako u měřené stejné kapaliny při 26 °C.



Obrázek 6-15 Tlakový spád při měření směsi olejů MIX73 na vyvinutém reometru

Pro zjištění vlivu hustoty kapaliny na součinitel místních tlakových ztrát proběhly stejným způsobem ještě měření jiné newtonské kapaliny s vyšší hustotou – brzdová kapalina DOT3. Obrázek 6-16 zobrazuje porovnání naměřených dat pro tuto kapalinu s teoretickými hodnotami.

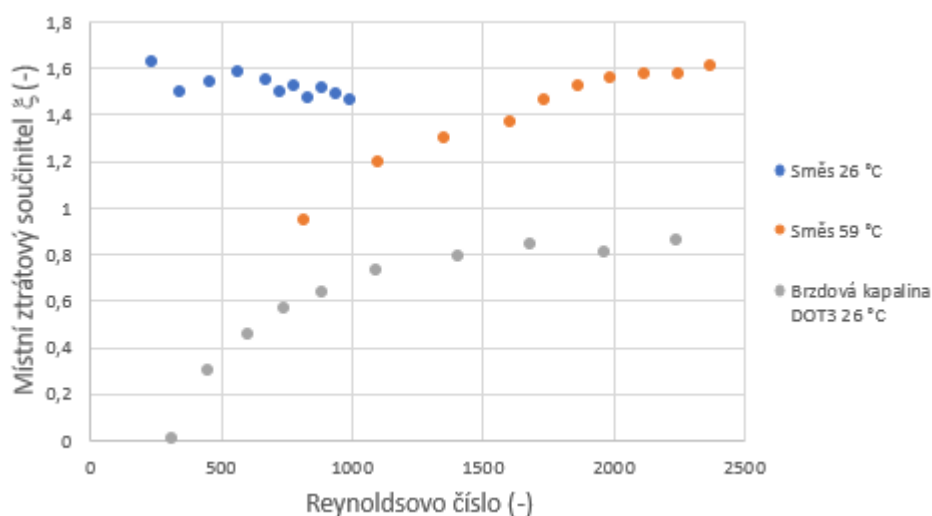


Obrázek 6-16 Data z měření brzdové kapaliny DOT3

Jako poslední krok se data ze všech měření použila pro výpočet a vykreslení závislosti součinitele místních ztrát na Reynoldsově čísle. Rovnice použité při tomto vykreslování byly popsány v příloze 12.6.3 a rovnice (6-3) byla použita pro jeho výpočet. Obrázek 6-17 poskytuje pohled na výslednou závislost.

$$\xi_m = \frac{2\Delta p_{\text{nam}}}{\rho v_s^2} - \frac{96l}{Re d_h} \quad (6-3)$$

kde ξ_m je ztrátový součinitel místních ztrát, Δp_{nam} je naměřená hodnota tlakového spádu v Pa, ρ je hustota kapaliny v kg/m^3 , v_s je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s, l je délka štěrbin v m, Re je Reynoldsovo číslo a d_h je hydraulický průměr štěrbin v m.



Obrázek 6-17 Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle

V této závislosti se neuvažovaly body z měření při velmi nízkých Reynoldsových číslech, protože mohly být ovlivněny nepřesností snímačů. Je vidět, že velikost součinitele místních ztrát závisí jak na viskozitě kapaliny, tak na její hustotě.

Zajímavé jsou body z měření směsi olejů pro 26 °C, protože se zcela liší od zbylých dvou kapalin. Jejich závislost není rostoucí, ale je klesající. Podobný rozdíl v průběhu ztrátového součinitele získal i Ing. Michal Kubík, Ph.D. v CFD simulacích, které prováděl v rámci svého výzkumu. Ze zatím nejasných příčin se i v těchto simulacích obrátil průběh křivek.

Měřená směs olejů má při 26 °C téměř stejnou dynamickou viskozitu, jako brzdová kapalina při 26 °C (viz příloha E2). I přes to je ale závislost ztrátového součinitele klesající. Hustota kapaliny také nehraje roli, protože směs olejů při 59 °C má hustotu ještě menší než směs při 26 °C a stejně tak viskozitu, závislost ztrátového součinitele je ale rostoucí. Je zde tedy ještě další, dosud neznámý, vliv.

V příloze E2 je navíc ještě proveden výpočet místního ztrátového součinitele na základě teoretické hodnoty tlakového spádu. Ze všech vyzkoušených teoretických přístupů se pro výpočet uvažoval ten, který poskytoval nejbližší hodnoty naměřeným hodnotám. Rovnice pro jeho vyčíslení byly použity stejné, jako při zpracování naměřených dat. Je zajímavé, že v tomto výpočtu je nejen průběh pro všechny kapaliny stejný, ale téměř stejné jsou i hodnoty ztrátového součinitele pro všechny kapaliny.

7 ZÁVĚR

V téhle diplomové práci byla úspěšně vyvinuta, vyrobená a otestována čtvrtá evoluce slit-flow reometru spolu s dalšími nezbytnými součástmi, jako např. jeho držák, rám pohonu nebo přípravky pro od vzdušňování. Oproti třetí evoluci slit-flow reometru poskytuje vyvinuté zařízení lepší uživatelskou přívětivost, umožňuje snadné a rychlé sestavení a rozšiřuje možnosti výzkumu. Na vyvinutém reometru je možné použít tlakoměry až do 200 bar při maximální hnací síle až 15 kN, což je dvakrát víc, než umožňovala třetí evoluce.

Významným prvkem vyvinuté čtvrté evoluce slit-flow reometru je možnost používat výměnné vložky jak v nemagnetickém těle, tak v magnetickém obvodu. Díky tomu je možné jednoduše měnit parametry štěrbin a zkoumat vliv např. drsnosti stěn, životnost různých materiálů stěn a je možné měnit i tloušťku štěrbin. U MR kapalin se může navíc ještě zkoumat efekt kotvy u vložek z nemagnetických materiálů. Jedna vložka ve štěrbině může být tvořena více materiály.

Vyvinuté zařízení umožňuje i použití různých délek štěrbin. Díky tomu bude možné lépe odhadnout stabilizační délku potřebnou pro vytvoření rychlostního profilu. V případě měření MR kapalin bude navíc možné délkou štěrbin měnit délku aktivní zóny a zkoumat tak její vliv na MR efekt dané MR kapaliny.

Na obou stranách štěrbin jsou umístěny tzv. vtoky, jejich hlavním úkolem je minimalizovat vtokové tlakové ztráty. Geometrie vtoků zároveň zmenšuje oblast víření kapaliny na začátku štěrbin. Díky tomu se zkrátí stabilizační délka a příznivá geometrie vtoků způsobí, že se laminární proudění ve štěrbině bude pravděpodobně vyskytovat i u vyšších Reynoldsových čísel, než obecná hranice $Re = 2300$. Pro dosahování vysokých hodnot smykových spádů by tak bylo vhodné v budoucnu určit, do jaké hodnoty Reynoldsova čísla je proudění ve štěrbině ještě laminární.

Během testovacích měření se odhalilo problematické místo konstrukce. Při frekvenci protlačení 1,6 Hz a amplitudě ± 40 mm se vodící tyče dostávají do rezonance a vibrace způsobují zadírání lineárního kuličkového ložiska. V tomto okamžiku je možné dosáhnout maximálního smykového spádu v nemagnetické štěrbině $\dot{\gamma} = 84\,000\text{ s}^{-1}$. Tento jev se nepodařilo odstranit ani vyztužením vodících tyčí a dalšími dodatečnými úpravami.

Do budoucna proto bude vhodné vyřešit dodatečné vyztužení vodících tyčí, protože tento jev omezuje rozsah měřitelných rychlostí. Další možností by také mohlo být vyřešit spojení rámu pohonu s vodící tyčí jinak, než kuličkovým lineárním ložiskem.

Nad rámec zadání byla započata kalibrační měření nemagnetické štěrbin, jejichž cílem bylo určit závislost místních ztrát této štěrbin na Reynoldsově čísle. Zároveň se při těchto měřeních otestoval nový přístup, který nevyžaduje použití snímače polohy plovoucího pístu. Tato závislost se pro štěrbinu magnetického obvodu může lišit, proto bude vhodné v budoucnu provést stejná kalibrační měření i pro tento obvod. Potřebné teoretické podklady pro kalibrační měření jsou v téhle práci.

Na základě výsledků kalibračního měření je patrné, že součinitel místních ztrát je závislý i na hustotě a viskozitě kapaliny. Mohlo by být proto vhodné rozšířit kalibrační měření o více kapalin, aby se získala lepší představa o jeho závislosti.

Během kalibračních měření se ověřilo, že při rychlostech pístu do 50 mm/s je možné použít naměřený tlakový spád pro výpočet dynamické viskozity u newtonských kapalin. Kvůli nízkým tlakům je ale nutné použít tlakoměry s malým rozsahem, aby naměřená data neovlivnil šum. Při výpočtu z takto naměřených dat se bude odchylka pohybovat rádově v jednotkách procent, takže bude prakticky zanedbatelná.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAZŮREK, I.; ROUPEC, J.; STRECKER, Z.; Vysoké učení technické v Brně Technická 2896/2 616 69 BRNO Česká Republika: *Obtokový reometr pro testování vlastností magnetoreologických kapalin a způsob analýzy dat*. Patentový spis: CZ 2014-802 A3. 2016. Česká Republika.
- [2] PAAR, Anton. *Basics of rheology*. [vid. 24. březen 2019]. Dostupné z: <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/#rotational-tests-and-viscosity>
- [3] DR. LOREDANA M. VÖLKER-POP. *Magneto-Rheological Device: TwinGap™ Geometry (MRD / TG)*. [vid. 24. březen 2019]. Dostupné z: <https://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=13030&L=24&dhash=9f106539b269b8eea8823469c4ad907a>
- [4] CARLSON, J. David. What Makes a Good MR Fluid? *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2002, roč. 13, č. 7–8, s. 431–435. ISSN 1045-389X.
- [5] MAZŮREK, I.; ROUPEC, J.; STRECKER, Z.; Vysoké učení technické v Brně Technická 2896/2 616 69 BRNO Česká Republika: *Pístový reometr pro testování magnetoreologických kapalin a způsob analýzy dat*. Patentový spis CZ 305809 B6. 2016. Česká Republika.
- [6] LUTZ, Andreas. *Anton Paar - Webinar Paints and Coatings*. 2019. Dostupné z: Webinar 11.28.2019
- [7] GONCALVES, Fernando D., Mehdi AHMADIAN a J. D. CARLSON. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. *Smart Materials and Structures*. 2006, roč. 15, č. 1, s. 75–85. ISSN 09641726.
- [8] WERELEY, Norman M. *Magnetorheology: Advances and Applications*. Vol. 6. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2014. ISBN 978-1-84973-667-1.
- [9] BUCHTA, Tomáš. *Staviteľný portál pro hydraulický pulsátor Inova*. B.m., 2016. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [10] URBAN, Ondřej. *Fyzikální vlastnosti kapalin*. [vid. 21. březen 2019]. Dostupné z: <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=dnV0YnluY3p8bWF0ZXJpYWx5LTVoeXxneDoxY2I5Y2MyZDhkm2NmOTVm>
- [11] ÇENGEL, YUNUS A., John M. CIMBALA. *Fluid mechanics: fundamentals and applications*. Third edit. New York: McGraw Hill, 2014. ISBN 978-0-07-338032-2.
- [12] GONCALVES, Fernando D. *Characterizing the Behavior of Magnetorheological Fluids at High Velocities and High Shear Rates*. B.m., 2005. Virginia Tech. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10919/26142>
- [13] HALAMA, Lukáš. *Studium chování neneutonských kapalin ve Slit-flow reometru za podmínek nestabilního toku*. B.m., 2019. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Roupec, Ph.D.
- [14] MAZŮREK, Ivan; Jakub; ROUPEC, Milan; KLAPKA a Zbyněk; STRECKER. *Load and rheometric unit for the test of magnetorheological fluid*. *Meccanica*. 2013, roč. 48, č. 3, s. 631–641. ISSN 00256455.

- [15] ROUPEC, J., I. MAZŮREK, Z. STRECKER a M. KLAPKA. *The behavior of the MR fluid during durability test. Journal of Physics: Conference Series*. 2013, roč. 412, č. 1. ISSN 17426596.
- [16] UTAMI, Dewi, UBAIDILLAH, Saiful A. MAZLAN, Fitriani IMADUDDIN, Nur A. NORDIN, Irfan BAHUDDIN, Siti Aishah ABDUL AZIZ, Norzilawati MOHAMAD a Seung Bok CHOI. *Material characterization of a magnetorheological fluid subjected to long-term operation in damper. Materials*. 2018, roč. 11, č. 11. ISSN 19961944.
- [17] INSTRUMENTS, Ta. *Understanding Rheology of Structured Fluids*. [vid. 6. únor 2020]. Dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/7786/863fc167604a487116013cf453fc500412b1.pdf?_ga=2.157531386.1111439894.1580987302-2142144664.1580987302
- [18] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987. ISBN 04-233-87.
- [19] ŠOB, František. *Hydromechanika*. 2. vyd. B.m.: Akademické nakladatelství CERM Brno, 2008. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [20] BOOR, B., KUNŠTÁTSKÝ, J., PATOČKA, C. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha: SNTL, 1968. ISBN 04-710-68.
- [21] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTÁVA. *Mechanika tekutin*. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, nedatováno.
- [22] REZA, Sadri M. *Channel entrance flow*. B.m., 1997. Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Western Ontario.
- [23] DRÁBKOVÁ, S. *Mechanika tekutin*. 2007. ISBN 9788024815084.
- [24] STEJSKAL, Jan. *Proudění magnetické kapaliny s aplikací binghamova modelu*. B.m., 2013. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.
- [25] MEEKER, Steven P., Roger T. BONNECAZE a Michel CLOITRE. *Slip and flow in pastes of soft particles: Direct observation and rheology. Journal of Rheology*. 2004, roč. 48, č. 6, s. 1295–1320. ISSN 0148-6055.
- [26] LEMAIRE, E. a G. BOSSIS. *Yield stress and wall effects in magnetic colloidal suspensions. Journal of Physics D: Applied Physics*. 1991, roč. 24, č. 8, s. 1473–1477. ISSN 13616463.
- [27] LAGGER, H. G., C. BIERWISCH, M. MOSELER, H. G. LAGGER, C. BIERWISCH a M. MOSELER. *MRF in a plate-plate magnetorheometer: Numerical insight into the particle-wall interface. Journal of Physics: Conference Series*. 2013, roč. 412, č. 1. ISSN 17426596.
- [28] *Tlakoměr P8AP data sheet*. [vid. 13. únor 2020]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/B00521.pdf>
- [29] LAUN, Hans Martin, Claus GABRIEL a Christoffer KIEBURG. *Wall material and roughness effects on transmittable shear stresses of magnetorheological fluids in plate-plate magnetorheometry. Rheologica Acta*. 2011, roč. 50, č. 2, s. 141–157. ISSN 00354511.
- [30] BRIOL, S.r.o. *Utahovací momenty šroubů*. [vid. 17. leden 2020]. Dostupné z: <https://www.briol.cz/technicke-informace/utahovaci-momenty-sroubu>

- [31] LAGGER, Hanna G., Claas BIERWISCH a Michael MOSELER. *Effects of wall roughness on shear stress in a magnetorheological fluid shear cell. 5th World Tribology Congress, WTC 2013*. 2013, roč. 4, s. 3539–3542.
- [32] KRATINA, Jakub. *SOUČINITEL TŘENÍ*. 2013 [vid. 14. leden 2020]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [33] KUTIL.CZ. *Závitová tyč mosaz 1m DIN 975*. [vid. 14. leden 2020]. Dostupné z: <https://www.kutil.cz/spojovaci-material-a-kotevni-technika/srouby/zavitove-tyce/zavitova-tyc-mosaz-1m-din-975/>
- [34] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 5. doplněn. B.m.: Albra, 2010. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [35] MITCALC. *Předepjatý šroubový spoj*. [vid. 21. leden 2020]. Dostupné z: <http://www.mitcalc.com/doc/boltcon/help/cz/boltcon.htm>
- [36] SHIGLEY, JOSEPH EDWARD, CHARLES R. MISCHKE, RICHARD G. (RICHARD GORDON) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. B.m.: V Brně: VUTIIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [37] *Mechanické vlastnosti dutých profilů z nelegovaných ocelí*. [vid. 15. prosinec 2019]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/trubky1-S355J2H.pdf>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

a	výška těla držáku
a_c	součinitel pro výpočet vlivu jakosti povrchu
a_s	tloušťka paty zubu
A_s	výpočtový průřez šroubu
b_c	exponent pro výpočet vlivu jakosti povrchu
b, h	šířka a tloušťka štěrbin slit-flow reometru
b_p	výška paraboly při tvorbě rychlostního profilu
b_t, h_t	šířka a tloušťka průřezu těla držáku
b_v, h_v	šířka a tloušťka průřezu výpalku
D	průměr potrubí
D_1	malý průměr matice
d	velký průměr závitu
d_d	průměr drážky závitu
d_e	efektivní rozměr pro nekruhové průřezy
d_h	hydraulický průměr
d_t	průměr tyče
d_2	střední průměr závitu
d_3	malý průměr závitu
E	Youngův modul
F_D	síla působící na jednu distanci
F_i	síla předpětí šroubu
F_{kr}	kritická hodnota síly
F_{max}	maximální velikost síly od lineárního aktuátoru
F_N	normálová síla
F_p	síla lineárního aktuátoru
F_{pmax}	síla lineárního aktuátoru zvýšená o návrhový součinitel
F_s	největší síla, kterou je šroub namáhán
F_{sx}	přírůstek síly vlivem ohybového momentu
F_t	třecí síla
F_v	síla působící na vložku tvořící štěrbinu
F_{ZT}	síla působící na jednu závitovou tyč

f	frekvence
f_0	součinitel tření ve stykové ploše hlavy šroubu
f_s	součinitel tření v závitech
g	gravitační zrychlení
H_1	nosná hloubka závitu
h_s	hloubka zašroubování
h_y	příčná poloha ve štěrbině
h_1, h_2	výška ve zvolených botech Bernoulliho rovnice
i	poloměr osového kvadratického momentu
i_s	počet sloupců se šrouby svěrného spoje
K	součinitel utahovacího momentu
k	vzdálenost šroubů svěrného spoje od okraje těla držáku
k_a	součinitel vlivu jakosti povrchu
k_b	součinitel vlivu velikosti tělesa
k_c	součinitel vlivu způsobu zatěžování
k_{cu}	bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavy materiálu
k_d	součinitel vlivu teploty
k_e	součinitel spolehlivosti
k_f	součinitel zahrnující další vlivy
k_{msp}	bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti
k_n	návrhový součinitel
k_p	součinitel bezpečnosti pro tlakoměry
k_v	bezpečnost tyče k meznímu stavu vzpěrné stability
K_z	výsledná ztrátová konstanta daného systému
l_1, l_2	ramena pohyblivé části mechanismu
l	délka štěrbiny
l_{stab}	stabilizační délka pro vytvoření rychlostního profilu
l_t	délka tyče
l_u	délka počítaného úseku
l_{34}	délka úseku 3-4
LDE	Lifetime Dissipated Energy
M	ohybový moment
m	vzdálenost osy lineárního aktuátoru od osy vodící tyče
M_u	utahovací moment

m_p	parametr udávající osu symetrie paraboly
n_x	maximální rychlost ve vyvinutém rychlostním profilu
P	okamžitý mechanický výkon přeměněný na teplo
p	parametr udávající šířku paraboly
Δp	tlakový spád
Δp_{nam}	naměřená hodnota tlakového spádu
p_{dov}	dovolený tlak
p_{max}	maximální tlak v reometru
p_m	přírůstek tlakového spádu od místních tlakových ztrát
p_p	přírůstek tlakového spádu od tvorby rychlostního profilu
p_s	tlak ve štěrbině
p_{vi}	přírůstek tlakového spádu od viskózního tření
p_1, p_2	tlaky ve zvolených botech Bernoulliho rovnice
Q	celkový průtok v daném systému
R_1	rameno páky
Re	mez kluzu materiálu
Re	Reynoldsovo číslo
Rm	mez pevnosti materiálu
r	poloměr na osazení v drážce
r_p	poloměr kružnice
s	stoupání závitu
S_d	plocha průřezu drážky závitu
S_v	plocha průřezu válce
S_s	plocha průřezu štěrbině
S_s	plocha jedné stěny štěrbině
S_1	plocha parabolického rychlostního profilu
S_2	plocha pístového rychlostního profilu
t	čas
t_h	výška pístového profilu ve štěrbině
u	rychlost proudění kapaliny
v	osová vzdálenost mezi šrouby svěrného spoje
V	objem kapaliny
v_{max}	maximální rychlost pístu
v_v	vztažná rychlost
v_x	rychlost v daném místě rychlostního profilu

v_s	střední rychlost kapaliny ve štěrbině
v_v	střední rychlost kapaliny ve válci
v_1, v_2	rychlost ve zvolených botech Bernoulliho rovnice
W_k	modul průřezu v krutu
x	zvolené místo v průběhu tvorby rychlostního profilu
x_A	amplituda
x_m	vzdálenost od kraje štěrbin, ve které je vena-contracta
$x_{1,2}, y_{1,2}$	souřadnice libovolného bodu
x_A, y_A	souřadnice bodu A
x_p, y_p	souřadnice libovolného bodu na kružnici
y	poloha kolmá na směr proudění ve štěrbině
Y_z	ztrátová měrná energie
z	minimální potřebný počet závitů
z_p	zvolený parametr paraboly
α	úhel profilu závitu
α_v	součinitel pro vzpěr tyče
α_τ	součinitel tvaru pro krut
α_σ	součinitel tvaru pro tah
α_p	úhel tvorby rychlostního profilu
β_τ	součinitel vrubu pro krut
β_σ	součinitel vrubu pro tah
γ	smykový spád
ζ_1	ztrátový součinitel třecích ztrát
ζ_v	součinitel místních ztrát na výtoku
ζ_m	ztrátový součinitel místních ztrát
η	dynamická viskozita kapaliny
λ	třecí součinitel kapaliny o stěnu potrubí
μ_k	kinematická viskozita kapaliny
μ	součinitel tření
ρ	hustota kapaliny
σ_{red}	redukované napětí
σ	napětí v tahu
σ_N	nominální napětí v tahu

σ'_{co}	korigovaná mez únavy podle Marinovy rovnice
τ_k	smykové napětí v kapalině
τ_w	napětí na stěně štěrbiny
τ	napětí v krutu
τ_N	nominální napětí v krutu
ψ	úhel stoupání závitu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 1-1 Současný slit-flow reometr; 1 - válec s MR kapalinou, kterou protlačí plovoucí písty, 2 - temperační okruh, 3 - příruby, 4 – magnetické tělo s cívkou, 5 - štěrbinu.....	14
Obrázek 2-1 Měřicí geometrie; vlevo nahoře: typ kužel – deska, vlevo dole: typ disk – deska, vpravo: typ válec - válec [2].....	16
Obrázek 2-2 Řez zařízením vytvářejícím magnetické pole [3].....	17
Obrázek 2-3 První varianta zařízení pro MR kapaliny - Anton Paar [3]	17
Obrázek 2-4 Geometrie TwinGap™ [3]	18
Obrázek 2-5 Slit-flow reometr využívaný během experimentu; vlevo: reometr v zařízení, vpravo: detail reometru [7].....	19
Obrázek 2-6 Těleso se štěrbinou používané během experimentu [7]	19
Obrázek 2-7 Schéma reometru [8]	20
Obrázek 2-8 Dvoudílné těleso se štěrbinou [8].....	20
Obrázek 2-9 První evoluce reometru	22
Obrázek 2-10 Druhá evoluce slit-flow reometru; celkové schéma (vlevo), pohled na magnetické tělo (vpravo) [1] (upraveno).....	23
Obrázek 2-11 Třetí evoluce slit-flow reometru v rámu hydraulického pulsátoru Inova.....	25
Obrázek 2-12 Řez reometrem uloženým v hydraulickém pulsátoru Inova.....	26
Obrázek 2-13 Vlevo: nemagnetické tělo, vpravo: pohled na štěrbinu	27
Obrázek 2-14 Vlevo: Magnetické tělo, vpravo: pohled na opotřebení štěrbinu	28
Obrázek 2-15 Návrh magnetického těla.....	28
Obrázek 2-16 Reogram [10].....	30
Obrázek 2-17 Vlevo: MR kapalina v neaktivovaném stavu; vpravo: MR kapalina v aktivovaném stavu (v magnetickém poli) [14].....	31
Obrázek 2-18 Vývoj MR kapalin odolných proti provoznímu houstnutí [4].....	32
Obrázek 2-19 Závislost viskozity na teplotě při různé míře disipované energie [15].....	33
Obrázek 2-20 Změna viskozity v závislosti na smykovém spádu [17].....	34
Obrázek 2-21 Schematické znázornění štěrbinu	35
Obrázek 2-22 Vlevo: vznik víření ve štěrbině za ostrým přechodem, vpravo: hladký přechod [11]	37
Obrázek 2-23 Závislost délky oblasti "Vena contracta" na Reynoldsově čísle [22].....	37

Obrázek 2-24 Vliv rádiusu na velikost místního ztrátového součinitele [23].....	38
Obrázek 2-25 Závislost ztrátového součinitele na výtoku ze štěrbin [23]	38
Obrázek 2-26 Koncepce vložek před štěrbinou [13].....	40
Obrázek 2-27 Vlevo: plně vyvinuté laminární proudění, vpravo: plně vyvinuté turbulentní proudění [11].....	40
Obrázek 2-28 Rychlostní profil kapaliny s mezí toku při laminárním proudění [24].....	42
Obrázek 2-29 Porovnání hladkého a drsného povrchu, ● - drsný povrch (bez skluzu), o - hladký povrch (se skluzem) [25].....	43
Obrázek 2-30 Simulace hustoty magnetického toku [29]	43
Obrázek 2-31 Závislost smykového napětí na rychlosti proudění, a) pro délku 25,4 mm, b) pro délku 6,35 mm [7]	44
Obrázek 3-1 Vznik tuhého jádra u MR kapaliny; vlevo: možná podoba u rotačního reometru, vpravo: slit-flow reometr.....	46
Obrázek 3-2 Tlakový spád z reálného měření na třetí evoluci slit-flow reometru.....	48
Obrázek 3-3 Třetí evoluce slit-flow reometru v rámu hydraulického pulsátoru Inova.....	49
Obrázek 3-4 Rychlost proudění ve štěrbině, protlačení směrem dolů	52
Obrázek 3-5 Koncepce vložek před štěrbinou [13].....	53
Obrázek 4-1 Blokové schéma postupu řešení	56
Obrázek 4-2 Schéma celého zařízení	56
Obrázek 4-3 Schématické znázornění reometru v řezu s jednotlivými konstrukčními uzly....	57
Obrázek 4-4 Umístění magnetického a nemagnetického obvodu ve vyvíjeném reometru	58
Obrázek 4-5 Nemagnetické tělo; a) poloha vložek dána kolíkem, b) vložky vsunuty na volno, c) pohled z čelní strany.....	59
Obrázek 4-6 Skládání reometru s nemagnetickým obvodem.....	60
Obrázek 4-7 Provedení štěrbin; vlevo: asymetrická, vpravo: symetrická.....	60
Obrázek 4-8 Původní návrh nového magnetického těla založený na simulacích magnetického toku.....	61
Obrázek 4-9 Skládání reometru s magnetickým obvodem	61
Obrázek 4-10 Varianta magnetického těla s výměnnými vložkami	62
Obrázek 4-11 Druhá varianta magnetického obvodu.....	63
Obrázek 4-12 Přesah vložek magnetického obvodu	63
Obrázek 4-13 Varianta zajištění distance pomocí kolíku.....	64

Obrázek 4-14 Vtoky ve vyvíjeném slit-flow reometru	64
Obrázek 4-15 Vtoky v přírubě se zvýrazněným sklonem plochy	65
Obrázek 4-16 Poloha vtoků v přírubě jištěna kolíkem.....	65
Obrázek 4-17 Vlevo: zářezy mimo požadovanou oblast způsobené rádiusovou frézou; vpravo: ideální provedení vtoků.....	66
Obrázek 4-18 Vtoky upraveny pomocí nalisovaných válečků.....	66
Obrázek 4-19 Umístění snímačů a znázorněná poloha děr pro šrouby, reometr s magnetickým obvodem.....	67
Obrázek 4-20 Otvory pro snímače	67
Obrázek 4-21 Válec a temperační obvod vyvíjeného slit-flow reometru	68
Obrázek 4-22 Válec zaveden co nehlouběji do příruby	69
Obrázek 4-23 Válec uchycen za osazení na přírubě.....	70
Obrázek 4-24 Temperační obvod na reometru.....	71
Obrázek 4-25 Varianta s tlustou přírubou	72
Obrázek 4-26 Varianta s tenkou přírubou	72
Obrázek 4-27 Prostorové uspořádání pohonu reometru; vlevo: reometr uchycen na jedné vodící tyči, uprostřed: reometr v ose lin. aktuátoru s pohovem ve tvaru C, vpravo: reometr v ose aktuátoru s tyčovým pohonem	73
Obrázek 4-28 Držák reometru uchycen na jedné vodící tyči	74
Obrázek 4-29 Držák reometru varianta 1	75
Obrázek 4-30 Kolize snímače	76
Obrázek 4-31 Držák reometru varianta 1 - pohled na svěrný spoj.....	77
Obrázek 4-32 Postup vkládání; 1 – vložení reometru do spodní poloviny držáku, 2 – přiklonění horní poloviny, 3 – dotlačení a fixace horní poloviny držáku	77
Obrázek 4-33 Druhá varianta uchycení reometru na jedné tyči.....	78
Obrázek 4-34 Postup vkládání reometru; 1 – reometr se orientuje snímači dopředu, 2 – nahnutí a provlečení reometru dírou se závitem, 3 – ustavený reometr se dotáhne pomocí matice (růžová) a distanční trubky (modrá).....	79
Obrázek 4-35 Třetí varianta uchycení reometru na jedné vodící tyči	80
Obrázek 4-36 Rám pohonu reometru	81
Obrázek 4-37 Kinematické schéma pohonu reometru	81
Obrázek 4-38 Posuvný mechanismus se šroubem	83

Obrázek 4-39 Posuvný mechanismus se svěrným spojem.....	83
Obrázek 4-40 Rám pohonu reometru	84
Obrázek 4-41 Varianta navařené vložky	85
Obrázek 4-42 Varianta vložky jištěné maticemi	85
Obrázek 4-43 Schéma celého zařízení	86
Obrázek 4-44 Vlevo: vedení snímače mezi pístnicí a válcem; vpravo: vedení snímače skrz dutou pístnici	87
Obrázek 4-45 Vedení snímače, nahoře: na horní plovoucí píst, dole: na spodní plovoucí píst reometru	89
Obrázek 5-1 Kinematické schéma pohonu reometru	92
Obrázek 5-2 Celková konstrukce	92
Obrázek 5-3 Horní část reometru v řezu	93
Obrázek 5-4 Základní dvě konfigurace vyvinutého slit-flow reometru	94
Obrázek 5-5 Nemagnetické tělo	95
Obrázek 5-6 Asymetrická štěrbiná, rozměr štěrbině záměrně zvětšen	95
Obrázek 5-7 Vyvinutý reometr s nemagnetickým tělem	96
Obrázek 5-8 Výsledná konstrukce magnetického obvodu	96
Obrázek 5-9 Pohled na jistící šrouby vložek.....	97
Obrázek 5-10 Zajištění vložek magnetického obvodu	98
Obrázek 5-11 Pohled na opěrnou plochu vložek.....	99
Obrázek 5-12 Průběh tlaku ve štěrbině	100
Obrázek 5-13 Silové poměry v magnetickém obvodu	101
Obrázek 5-14 Umístění vtoků v přírubě.....	102
Obrázek 5-15 Skládání vyvinutého reometru pomocí párové měrky	103
Obrázek 5-16 Vlevo: asymetrie štěrbině, vpravo: vyrobené vtoky	104
Obrázek 5-17 Rychlost proudění; vlevo: reometr třetí evoluce; vpravo: nový reometr s vtoky	105
Obrázek 5-18 Rychlost proudění; vlevo: starý reometr, vpravo: nový reometr s vtoky	106
Obrázek 5-19 Pohled na přírubu, válec a válec temperačního obvodu s rychlospojkami.....	107
Obrázek 5-20 Pohled na přírubu s tlakoměrem.....	107
Obrázek 5-21 Válec s opěrnou plochou	108

Obrázek 5-22 Horní část reometru v řezu	108
Obrázek 5-23 Vlevo: schéma přívodu a odvodu vody do temperačního obvodu reometru; vpravo: připojení rychlospojky	109
Obrázek 5-24 Napětí ve válci při tlaku 200 bar	110
Obrázek 5-25 Konvergence výpočtu napětí	110
Obrázek 5-26 Konstrukční uzly celého návrhu	111
Obrázek 5-27 Držák reometru	112
Obrázek 5-28 Umístění šroubů výpalku	113
Obrázek 5-29 Kinematické schéma pohonu reometru	114
Obrázek 5-30 Nahoře: držák, dole: reometr v držáku	114
Obrázek 5-31 Reometr v držáku	115
Obrázek 5-32 Schématické zobrazení držáku při protlačení směrem nahoru	116
Obrázek 5-33 Schematicky znázorněné upevnění reometru v držáku pomocí výpalku a šroubů	117
Obrázek 5-34 Model použitý pro strukturální analýzu	118
Obrázek 5-35 Hlavní místa k úpravám na základě výsledků simulací	119
Obrázek 5-36 Protlačování směrem dolů - posun	119
Obrázek 5-37 Konvergence výpočtu	120
Obrázek 5-38 Protlačování směrem dolů, pohled na napětí ve spodní části držáku	120
Obrázek 5-39 Protlačování směrem dolů, pohled na napětí v horní části držáku	121
Obrázek 5-40 Maximální hodnota napětí na těle držáku	121
Obrázek 5-41 Konvergence výpočtu	121
Obrázek 5-42 Protlačování směrem dolů - posun	122
Obrázek 5-43 Konvergence	122
Obrázek 5-44 Napětí ve výpalku přidržující reometr; vlevo: horní strana, vpravo: spodní strana	123
Obrázek 5-45 Konvergence výpočtu napětí na výpalku	123
Obrázek 5-46 Vlevo: celková sestava, vpravo: rám pohonu reometru – jednotlivé části	124
Obrázek 5-47 Plochy určené k zarovnání po svařování	125
Obrázek 5-48 Horní část rámu pohonu reometru	126
Obrázek 5-49 Horní část rámu pohonu reometru	127

Obrázek 5-50 Spodní část pohonu reometru	128
Obrázek 5-51 Vychýlení rychlospojky	129
Obrázek 5-52 Namáhání tyče	130
Obrázek 5-53 Model použitý pro simulaci, protlačení nahoru.....	131
Obrázek 5-54 Deformace rámu pohonu - směr nahoru.....	132
Obrázek 5-55 Konvergence výpočtu deformace rámu pohonu - směr nahoru.....	132
Obrázek 5-56 Protlačování nahoru, napětí ve spodním profilu	133
Obrázek 5-57 Protlačování nahoru, napětí ve vnitřní části profilu	133
Obrázek 5-58 Vlevo: maximální napětí na vzpěře, vpravo: druhá strana vzpěry	133
Obrázek 5-59 Protlačení nahoru, napětí ve vnitřní části profilu	134
Obrázek 5-60 Konvergence výpočtu napětí	134
Obrázek 5-61 Napětí ve spodním profilu bez vzpěry	135
Obrázek 5-62 Model použitý pro simulaci, protlačení dolů.....	135
Obrázek 5-63 Deformace rámu pohonu – směr dolů	136
Obrázek 5-64 Deformace rámu pohonu – směr dolů, konvergence.....	136
Obrázek 5-65 Napětí ve spodním profilu rámu pohonu při protlačení směrem dolů – vnější	137
Obrázek 5-66 Napětí ve spodním profilu rámu pohonu při protlačení směrem dolů - vnitřní	137
Obrázek 5-67 Napětí ve spodním profilu rámu pohonu při protlačení směrem dolů – vnitřní	138
Obrázek 5-68 Konvergence výpočtu napětí při protlačení kapaliny dolů.....	138
Obrázek 5-69 Napětí v horní části rámu pohonu - protlačení směrem dolů	138
Obrázek 5-70 Napětí v horní části rámu pohonu (řez) - protlačení směrem dolů.....	139
Obrázek 5-71 Umístění držáku snímače	140
Obrázek 5-72 Držák snímače plovoucího pístu	140
Obrázek 5-73 Spojení siloměru s hydraulickým pulsátorem Inova	141
Obrázek 5-74 Proces odvzdušňování reometru.....	143
Obrázek 5-75 Ustavení polohy příruby a orientace vtoků pomocí spárové měřky.....	143
Obrázek 5-76 a) použití přípravku pro držení pístu; b) pohled na tvarový styk s rukojetí	144
Obrázek 5-77 Přípravek na protlačení kapaliny	145
Obrázek 5-78 Kinematické schéma přípravku na protlačení	146
Obrázek 6-1 Vyvinutá konstrukce.....	150

Obrázek 6-2 Vlevo: rozložení reometru, vpravo: proces odvzdušňování reometru.....	151
Obrázek 6-3 Ustavení polohy příruby a orientace vtoků pomocí spárové měrky.....	152
Obrázek 6-4 Přípravek na protlačení kapaliny	153
Obrázek 6-5 Základní dvě konfigurace vyvinutého slit-flow reometru	154
Obrázek 6-6 Možnost složit vyvinutý reometr bez štěrbin, pouze s vtoky	154
Obrázek 6-7 Reometr bez vtoků; vlevo: magnetický obvod, vpravo: nemagnetické tělo	155
Obrázek 6-8 Vlevo: tlaková zkouška, vpravo: místa netěsností	156
Obrázek 6-9 Postup montáže konstrukce na rám hydraulického pulsátoru Inova	157
Obrázek 6-10 Vyvinutá konstrukce.....	158
Obrázek 6-11 Pistnice upravená pro bodový kontakt	158
Obrázek 6-12 Zavedené úpravy na konstrukci.....	159
Obrázek 6-13 Porovnání teoretických tlakových spádů s těmi naměřenými	160
Obrázek 6-14 Tlakový spád při měření směsi olejů MIX73 na vyvinutém reometru.....	162
Obrázek 6-15 Tlakový spád při měření směsi olejů MIX73 na vyvinutém reometru.....	163
Obrázek 6-16 Data z měření brzdové kapaliny DOT3.....	163
Obrázek 6-17 Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle	164
Obrázek 12-1 Výsledná konstrukce magnetického obvodu.....	185
Obrázek 12-2 Detail štěrbin s naznačeným silovým působením	185
Obrázek 12-3 Silové poměry v magnetickém obvodu	187
Obrázek 12-4 Silové poměry v magnetickém obvodu	187
Obrázek 12-5 Rozměry štěrbin	190
Obrázek 12-6 Zajištění distancí pomocí kolíků	191
Obrázek 12-7 Držák reometru.....	194
Obrázek 12-8 Výpočet svěrného spoje v Autodesk Inventoru Professional 2019.....	194
Obrázek 12-9 Schématické zobrazení držáku při protlačení směrem nahoru	195
Obrázek 12-10 Schematicky znázorněné upevnění reometru v držáku pomocí výpalku a šroubů	200
Obrázek 12-11 Protlačování směrem nahoru, pohled na napětí v horní části držáku	204
Obrázek 12-12 Protlačování směrem nahoru, pohled na napětí ve spodní části držáku	205
Obrázek 12-13 Konvergence výpočtu napětí	205

Obrázek 12-14 Vlevo: celková sestava, vpravo: rám pohonu reometru – jednotlivé části	206
Obrázek 12-15 Namáhání tyče	207
Obrázek 12-16 Výpočet svěrného spoje v Autodesk Inventoru Professional 2019	209
Obrázek 12-17 Spojení siloměru s hydraulickým pulsátorem Inova	212
Obrázek 12-18 Zobrazení rozměrů spojky	214
Obrázek 12-19 Oblasti ve šterbině	218
Obrázek 12-20 Vyvinutý rychlostní profil ve šterbině.....	219
Obrázek 12-21 Rozdělení rychlostního profilu	222
Obrázek 12-22 Vývoj rychlostního profilu	223
Obrázek 12-23 Zvolený parametr paraboly jako funkce výšky pístového profilu.....	224
Obrázek 12-24 Schéma protlačení kapaliny šterbinou pro Bernoulliho rovnici	226
Obrázek 12-25 Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle	227
Obrázek 12-26 Struktura složek externích příloh.....	228

11 SEZNAM TABULEK

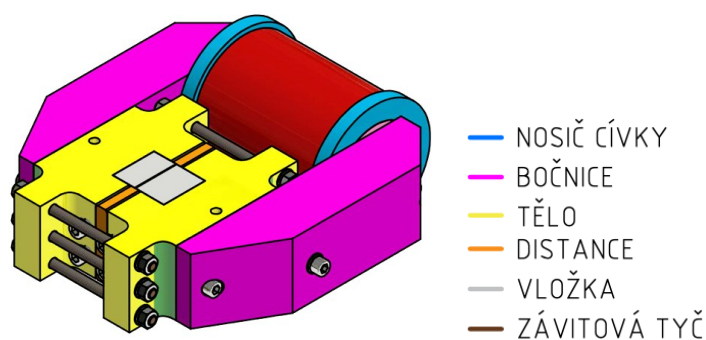
Tabulka 2-1 Základní technická data 1. evoluce reometru [5].....	23
Tabulka 2-2 Základní technická data 2. evoluce reometru [1].....	24
Tabulka 2-3 Základní technická data 3. evoluce reometru	27
Tabulka 3-1 Výhody a nevýhody jednotlivých evolucí reometru	50
Tabulka 5-1 Maximální síla pro jednotlivé tlakoměry (zaokrouhleno)	90
Tabulka 6-1 Rozdíl v tlakovém spádu v závislosti na použitém tlakoměru.....	161

12 SEZNAM PŘÍLOH

12.1 Příloha 1 – Magnetický obvod reometru

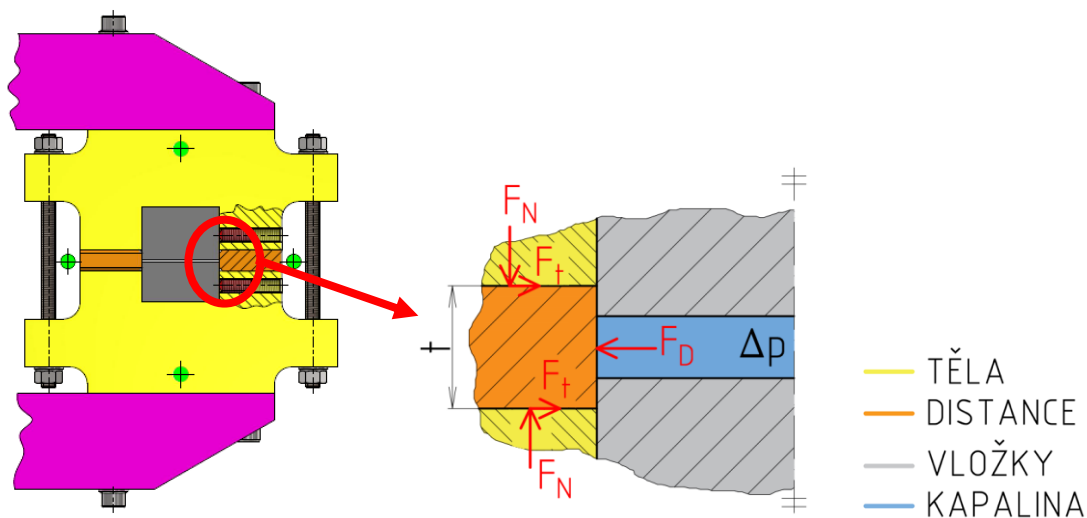
12.1.1 Příloha 1.1 – Zajištění distancí

Distance byly navrženy tak, aby mezi těly držely pouze díky tření. Tato výpočtová část proto ověřuje, jestli je takové zajištění reálné. Obrázek 12-1 zobrazuje finální konstrukci magnetického obvodu s viditelnými distancemi.



Obrázek 12-1 Výsledná konstrukce magnetického obvodu

Obrázek 12-2 schematicky zobrazuje detailní pohled na jednu polovinu magnetického obvodu s naznačeným silovým působením, kde F_D je síla působící na distanci vlivem tlaku kapaliny, F_N je normálová síla a F_t je třecí síla. Výpočet byl proveden pro maximální délku štěrbiny $l = 50$ mm, její maximální tloušťku $h = 2$ mm a konstantní šířku $b = 32$ mm. Vlivem poklesu tlaku během průtoku kapaliny štěrbinou nebyl pro výpočet uvažován tlak 200 bar, ale 100 bar.



Obrázek 12-2 Detail štěrbin s naznačeným silovým působením

Při výpočtu se neuvažovala celá tloušťka distance t , protože vložky přesně lícují s drážkami v tělech a i s distancemi. Hydraulické odpory mezi vložkami a distancemi budou velmi velké a nemůže zde tak vzniknout významné silové působení vlivem tlaku. Síla F_D , která působí na jednu distanci mezi těly magnetického obvodu, je tedy dána rovnicí (12-1).

$$F_D = p_{\max}hl = (100 \cdot 10^5) \text{ Pa} \cdot (0,002 \cdot 0,050) \text{ m} = 1 \text{ kN} \quad (12-1)$$

kde F_D je síla působící na jednu distanci v N, p_{\max} je maximální tlak v reometru v Pa, h je tloušťka štěrbin slit-flow reometru v m a l je délka štěrbin v m.

Je patrné, že musí platit rovnice (12-2), aby nedošlo k vytlačení distance. To znamená, že třecí síla F_t na jedné stěně distance musí být alespoň 500 N. Třecí sílu F_t je zároveň možné vyjádřit rovnicí (12-3) jako součin normálové síly F_N se součinitelem tření μ , který pro statický styk dvou ocelových suchých povrchů může dosahovat velikosti až 0,78 [32]. V tomto kontaktu bude ještě navíc přítomno tekuté těsnění. Nepodařilo se dohledat orientační hodnotu součinitele tření pro styk dvou ocelových ploch s těsněním, proto byla zvolena jeho konzervativní velikost jako čtvrtina ze součinitele tření pro styk dvou suchých ocelových povrchů, tzn. $\mu = 0,2$.

$$2F_t > F_D \quad (12-2)$$

$$F_t = F_N\mu \quad (12-3)$$

kde F_t je třecí síla v N, F_D je síla působící na jednu distanci v N, F_N je normálová síla v N a μ je součinitel tření.

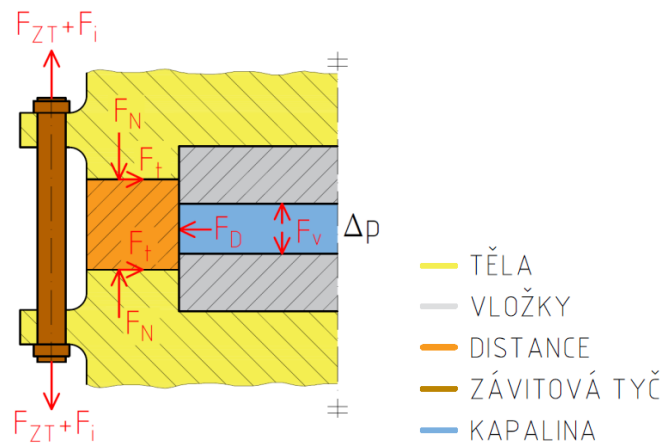
Po dosazení rovnice (12-3) do rovnice (12-2) je možné vyjádřit jednoduchými úpravami vztah (12-4) pro určení potřebné normálové síly v tomto kontaktu.

$$F_N = \frac{F_D}{2\mu} = \frac{1 \text{ kN}}{2 \cdot 0,2} = 2,5 \text{ kN} \quad (12-4)$$

kde F_D je síla působící na jednu distanci v N, F_N je normálová síla v N a μ je součinitel tření.

12.1.2 Příloha 1.2 – Namáhání závitových tyčí během měření

Cílem následujícího výpočtu bylo určit silové působení na šest závitových tyčí, které spojují obě poloviny magnetického obvodu. Při tomto výpočtu se opět uvažoval průměrný tlak ve štěrbině 100 bar pro maximální tlak ve válci 200 bar. Na základě znalosti tlaku a ploch stěn štěrbin bylo jednoduše možné spočítat silové působení, které díky tlaku vznikne – viz rovnice (12-5). Při výpočtu se uvažovala maximální délka štěrbin $l = 50$ mm a její šířka je konstantní $b = 32$ mm.



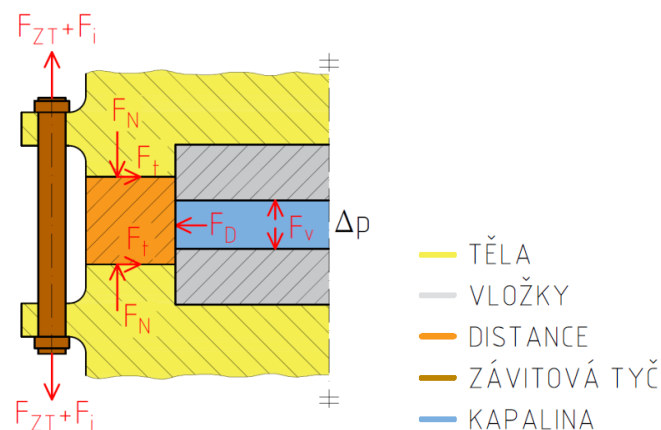
Obrázek 12-3 Silové poměry v magnetickém obvodu

Síla F_{ZT} je přírůstek síly na jednu závitovou tyč vlivem působení tlaku na vložky v magnetickém obvodu. Jedná se tedy o rozložení síly F_v , která vznikne vlivem tlaku na stěně vložek, mezi závitové tyče.

$$F_{ZT} = \frac{p_s S_s}{6} = \frac{p_s b l}{6} = \frac{10 \text{ MPa} \cdot 50 \text{ mm} \cdot 32 \text{ mm}}{6} = 2\,666,7 \text{ N} \rightarrow 2\,700 \text{ N} \quad (12-5)$$

kde F_{ZT} je síla působící na jednu závitovou tyč v N, p_s je tlak ve štěrbině v MPa, S_s je plocha jedné stěny štěrbiny v mm², b je šířka štěrbiny v mm a l je délka štěrbiny v mm.

Obě těla k sobě stahuje šest závitových mosazných tyčí – viz Obrázek 12-4. Tyto tyče byly umístěny symetricky, tzn. na jedné straně magnetického obvodu byly použity tři. Ve školní laboratoři byly k dispozici mosazné závitové tyče se závitem M6. V následujícím výpočtu proto bylo nutné ověřit, jestli je možné pomocí třech těchto mosazných závitových tyčí dosáhnout alespoň velikosti potřebné normálové síly na jednu distanci vypočítané v rovnici (12-4) a také to, jestli vydrží provozní zatížení.



Obrázek 12-4 Silové poměry v magnetickém obvodu

Mosazné závitové tyče se dodávají v pevnostní třídě 4.8 [33], což odpovídá minimální mezi pevnosti $Rm = 400$ MPa a minimální mezi kluzu $Re = 320$ MPa. V následujícím výpočtu byla určena největší síla předpětí, kterou je možné s danou závitovou tyčí dosáhnout a následně se tato hodnota porovnála s minimální normálovou silou potřebnou k zajištění distance spočítanou v rovnici (12-4).

Při tomto výpočtu se uvažoval stav, kdy je tyč utahována. K tomu se použil výpočet redukovaného napětí σ_{red} podle teorie měrné energie napjatosti změny tvaru pro houževnaté materiály – viz rovnice (12-6).

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (12-6)$$

kde σ_{red} je redukované napětí v MPa, σ je napětí v tahu v MPa a τ je napětí v krutu v MPa.

Napětí od tahové složky σ je možné spočítat podle rovnice (12-7):

$$\sigma = \frac{F_i}{A_s} \quad (12-7)$$

kde F_i je síla předpětí šroubů v N a A_s je výpočtový průřez závitové tyče v mm^2 .

Napětí τ od utahovacího momentu M_u se spočítalo podle rovnice (12-8).

$$\tau = \frac{M_u}{W_k} = \frac{16M_u}{\pi d_3^3} = \frac{16KF_i d}{\pi d_3^3} \quad (12-8)$$

kde τ je napětí v krutu v MPa, M_u je utahovací moment v Nm, W_k je modul průřezu v krutu v m^3 , d_3 je malý průměr závitu v m, K je součinitel utahovacího momentu, F_i je síla předpětí šroubů v N a d je velký průměr závitu v m.

Pro určení dosažitelného předpětí dané závitové tyče se musí redukované napětí σ_{red} rovnat mezi kluzu Re . Uvažoval se součinitel bezpečnosti k meznímu stavu pružnosti roven 1, protože se spočítaná síla a stejně tak utahovací moment budou zaokrouhlovat směrem dolů. Dosazením rovnic (12-7) a (12-8) do rovnice (12-6) a následnou úpravou se získala rovnice (12-9), která udává dosažitelnou velikost předpětí jedné mosazné závitové tyče se závitem M6. Jako poslední neznámá proměnná v této rovnici vystupuje součinitel utahovacího momentu K .

$$F_i = \sqrt{\frac{Re^2}{\frac{1}{A_s^2} + 3 \frac{16^2 K^2 d^2}{\pi^2 d_3^6}}} \quad (12-9)$$

kde F_i je síla předpětí šroubů v N, Re je mez kluzu materiálu v MPa, A_s je výpočtový průřez závitové tyče v mm^2 , K je součinitel utahovacího momentu, d je velký průměr závitu v m a d_3 je malý průměr závitu v m.

Výpočet součinitele utahovacího momentu K je možné spočítat podle rovnice (12-11). Vnější průměr závitu d je stejně jako jeho střední průměr d_2 možné snadno dohledat ve strojnických tabulkách [34]. Při výpočtu byly důležité součinitele tření, jednalo se konkrétně o součinitel tření v závitech f_s a o součinitel tření ve stykové ploše hlavy šroubu f_0 . Jejich hodnota byla zvolena na základě internetového zdroje [35]. Jedná se o metrický závit, proto úhel profilu α je 60° a závit M6 má standardní stoupání $s = 1$ mm. Úhel stoupání ψ se spočítá podle rovnice (12-10):

$$\psi = \frac{s}{\pi d_2} = \frac{1 \text{ mm}}{\pi \cdot 5,35 \text{ mm}} = 0,059 \text{ rad} \quad (12-10)$$

kde ψ je úhel stoupání v rad, s je stoupání závitu v mm a d_2 je střední průměr závitu v mm.

$$K = \frac{d_2}{2d} \left(\frac{\text{tg } \psi + \frac{f_s}{\cos \frac{\alpha}{2}}}{1 - \frac{f_s \text{tg } \psi}{\cos \frac{\alpha}{2}}} \right) + 0,625 f_0 = \quad (12-11)$$

$$= \frac{5,35 \text{ mm}}{2 \cdot 6 \text{ mm}} \left(\frac{\text{tg}(0,059 \text{ rad}) + \frac{0,17}{\cos \frac{1,047 \text{ rad}}{2}}}{1 - \frac{0,17 \cdot \text{tg}(0,059 \text{ rad})}{\cos \frac{1,047 \text{ rad}}{2}}} \right) + 0,625 \cdot 0,19 = 0,222$$

kde K je součinitel utahovacího momentu, d_2 je střední průměr závitu v mm, d je velký průměr závitu v mm, ψ je úhel stoupání v rad, f_s je součinitel tření v závitech, α je úhel profilu závitu v rad a f_0 je součinitel tření ve stykové ploše hlavy šroubu.

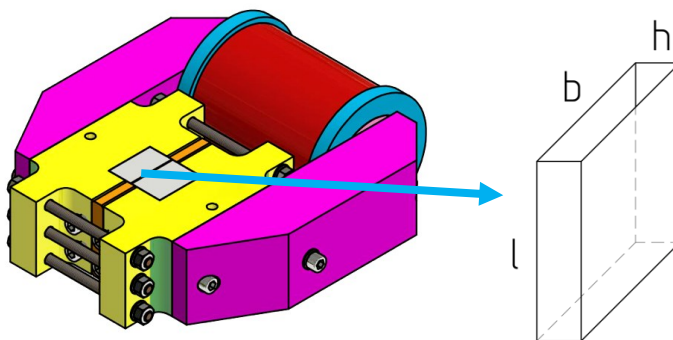
Nyní již jsou známé všechny hodnoty pro výpočet dosažitelné síly předpětí F_i jedné závitové tyče. Dosazením do rovnice (12-9) proběhl tento výpočet – viz rovnice (12-12).

$$F_i = \sqrt{\frac{320 \text{ MPa}}{\frac{1}{(20,1 \text{ mm}^2)^2} + 3 \frac{16^2 \cdot 0,222^2 (6 \text{ mm})^2}{\pi^2 (4,596 \text{ mm})^6}}} = 2 \, 444 \text{ N} \quad (12-12)$$

Při použití tří mosazných závitových tyčí je možné dosáhnout celkové normálové síly na jednu distanci 7,3 kN. Výsledek rovnice (12-4) stanovil minimální normálovou sílu na 2,5 kN, tím pádem toto řešení je naprosto dostatečné.

12.1.3 Příloha 1.3 – Síla namáhající vložky ve směru proudění kapaliny

Cílem tohoto výpočtu bylo určit velikost síly, jakou je vložka v magnetickém obvodu (popř. v nemagnetickém těle) namáhána ve směru protlačování kapaliny při maximálním tlakovém spádu 200 bar. Uvažovala se maximální délka štěrbiny $l = 50 \text{ mm}$, maximální tloušťka $h = 2 \text{ mm}$ a konstantní šířka $b = 32 \text{ mm}$. Obrázek 12-5 zobrazuje jenom rozměry štěrbiny, tlakový spád Δp je dán rozdílem tlaků na obou jejích stranách.



Obrázek 12-5 Rozměry štěrbiny

Při výpočtu se vycházelo z rovnováhy sil, pomocí které se vyjádří vztah pro výpočet smykového napětí na stěně τ_w – viz rovnice (12-13).

$$\Delta p b h = \tau_w 2 l b \rightarrow \tau_w = \frac{\Delta p h}{2 l} \quad (12-13)$$

kde Δp je tlakový spád v Pa, b a h je šířka a tloušťka štěrbiny slit-flow reometru v m, τ_w je napětí na stěně štěrbiny v Pa a l je délka štěrbiny v m.

Výsledná hodnota síly působící na jednu vložku se získala tak, že se smykové napětí na stěně vynásobí plochou stěny – viz rovnice (12-14). Je tedy vidět, že vložky nejsou ani při maximálním tlakovém spádu moc namáhány ve směru protlačení kapaliny. Opěrné plochy vložek magnetického obvodu (viz Obrázek 5-11) tak budou bezproblémové.

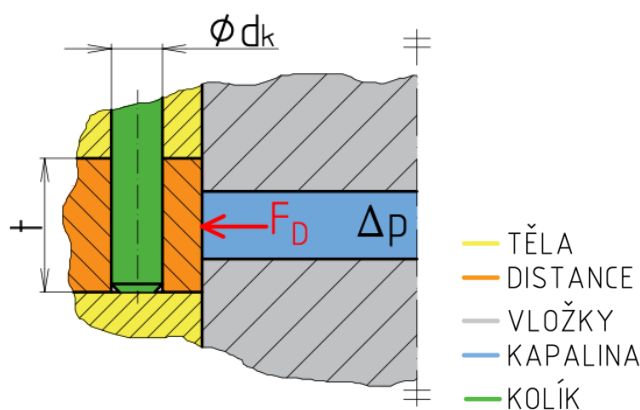
$$F_v = \tau_w l b = \frac{\Delta p h b}{2} = \frac{(100 \cdot 10^5) \text{ Pa} \cdot (0,002 \cdot 0,032) \text{ m}}{2} = 320 \text{ N} \quad (12-14)$$

kde F_v je síla působící na vložku tvořící štěrbinu v N, τ_w je napětí na stěně štěrbiny v Pa a l je délka štěrbiny v m.

12.1.4 Příloha 1.4 – Varianta zajištění distancí pomocí kolíku

Zajištění polohy distancí pomocí kolíku je nejjednodušší řešení. Aby nedocházelo k magnetickému zkratu mezi dvěma těly magnetického obvodu, je nutné použít kolíky z nemagnetického materiálu. To není problém, protože jsou běžně k dostání i z nerezového materiálu. Může se ale stát, že nerezový materiál bude magnetický, i přes to je možné potřebné kolíky vyrobit z jiného nemagnetického materiálu. Šrouby jistící vložky v magnetickém obvodu omezují prostor pro kolík, proto bylo rovnou počítáno se dvěma kolíky o menším průřezu.

Obrázek 12-6 poskytuje pohled na umístění jednoho kolíku na jedné straně magnetického obvodu. Během výpočtu bylo uvažováno, že jednu distanci jistí dva kolíky. Jak je vidět, kolík je umístěn pouze v jednom těle. Je to záměr, protože se tím zjednoduší výroba. Během montáže magnetického obvodu bude navíc poloha druhého těla dána díky vložce.



Obrázek 12-6 Zajištění distancí pomocí kolíků

Kolíky v nerezovém provedení se vyrábí z materiálu 1.4305, který má minimální mez kluzu v tahu $R_{p0,2} = 190$ MPa. Je známo, že mez kluzu ve smyku R_{se} má poloviční hodnotu oproti mezi kluzu v tahu, proto se počítá s hodnotou $R_{se,min} = 95$ MPa. Cílem výpočtu v rovnicích (12-16) a (12-17) bylo určit potřebný průměr jednoho kolíku d_k , aby nedošlo k jeho ustřížení při působení síly F_D . Tato síla se už počítala na základě celé tloušťky distance, která je $t = 9$ mm.

$$F_D = p_{\max} t l = (100 \cdot 10^5) \text{ Pa} \cdot (0,009 \cdot 0,050) \text{ m} = 4\,500 \text{ N} \quad (12-15)$$

$$\tau_s = \frac{F_D}{2S_k} = \frac{2F_D}{\pi d_k^2} \leq R_{se,min} \quad (12-16)$$

$$d_k = \sqrt{\frac{2F_D}{\pi R_{se,min}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4\,500 \text{ N}}{\pi \cdot 95 \text{ MPa}}} = 5,49 \text{ mm} \rightarrow 6 \text{ mm} \quad (12-17)$$

kde F_D je síla působící na jednu distanci v N, p_{\max} je maximální tlak v Pa, t_d tloušťka distance v mm, l je délka štěrbin v m, τ_s je napětí ve stříhu v MPa, S_k je plocha kolíku v mm², d_k je průměr kolíku v mm a R_{se} je mez kluzu ve smyku v MPa.

Průměr kolíku d_k vypočítaný v rovnici (12-17) se zvýšil na nejbližší vyšší normalizovaný rozměr. Na základě tohoto rozměru se následně v rovnici (12-18) určilo skutečné napětí v jednom kolíku při působení síly F_D na distanci. Z této hodnoty se nakonec v rovnici (12-19) určila bezpečnost vzhledem k ustřížení k_s .

$$\tau_s = \frac{F_D}{2S_k} = \frac{2F_D}{\pi d_k^2} = \frac{2 \cdot 4\,500 \text{ N}}{\pi (6 \text{ mm})^2} = 79,6 \text{ MPa} \quad (12-18)$$

$$k_s = \frac{R_{se,\min}}{\tau_s} = \frac{95 \text{ MPa}}{79,6 \text{ MPa}} = 1,19 \quad (12-19)$$

kde τ_s je napětí ve stříhu v MPa, F_D je síla působící na jednu distanci v N, S_k je plocha kolíku v mm², d_k je průměr kolíku v mm a R_{se} je mez kluzu ve smyku v MPa.

Jako poslední operace se ověřilo, že nedojde k otlacení mezi distancí a kolíky. Obě součásti jsou uvažovány z materiálu 1.4305, který má dovolený tlak $p_{\text{dov}} = 100 \text{ MPa}$. V rovnici (12-20) se nejprve spočítal tlak mezi kolíkem a distancí, na základě této hodnoty se následně v rovnici (12-21) vypočítala bezpečnost.

$$p = \frac{F_D}{2S_k} = \frac{F_D}{2d_k t} = \frac{4\,500 \text{ N}}{2(6,9) \text{ mm}} = 41,7 \text{ MPa} \quad (12-20)$$

$$k_p = \frac{p_{\text{dov}}}{p} = \frac{100 \text{ MPa}}{41,7 \text{ MPa}} = 2,4 \quad (12-21)$$

kde p je tlak v MPa, F_D je síla působící na jednu distanci v N, S_k je plocha kolíku v mm², d_k je průměr kolíku v mm, t je tloušťka distance v mm, k_p je bezpečnost vůči otlacení a p_{dov} je dovolený tlak.

12.2 Příloha 2 – Korigovaná mez únavy válce reometru

K určení bezpečnosti bylo nejprve nutné spočítat korigovanou mez únavy. Válec je vyroben z materiálu ST52 BK+S DIN2391, který má minimální mez pevnosti $R_m = 590 \text{ MPa}$. Pro výpočet korigované meze únavy se využila Marinova rovnice (12-22). Pro výpočet bylo potřeba nejprve určit součinitele v téhle rovnici.

$$\sigma'_{co} = k_a k_b k_c k_d k_e k_f 0,504 R_m \quad (12-22)$$

kde σ'_{co} je korigovaná mez únavy podle Marinovy rovnice v MPa, k_a je součinitel vlivu jakosti povrchu, k_b je součinitel vlivu velikosti tělesa, k_c je součinitel vlivu způsobu zatěžování, k_d je součinitel vlivu teploty, k_e je součinitel spolehlivosti, k_f je součinitel zahrnující další vlivy a Rm je mez pevnosti materiálu v MPa.

Součinitel vlivu jakosti povrchu k_a se počítá podle rovnice (12-23). Součinitel a_c a exponent b_c byly voleny na základě technologie, kterou se dokončuje povrch – viz strana 346 v [36].

$$k_a = a_c Rm^{b_c} = 4,51 \cdot (590 \text{ MPa})^{-0,265} = 0,831 \quad (12-23)$$

Součinitel vlivu velikosti tělesa k_b se počítá podle rovnice (12-25). Jelikož se jedná o nerotující kruhový průřez, musí se počítat s efektivním rozměrem d_e podle rovnice (12-24).

$$d_e = 0,37d = 0,37 \cdot 42 \text{ mm} = 15,54 \text{ mm} \quad (12-24)$$

kde d_e je efektivní rozměr pro nekruhové průřezy v m a d je průměr válce.

$$k_b = 1,24d_e^{-0,107} = 1,24 \cdot (15,54 \text{ mm})^{-0,107} = 0,925 \quad (12-25)$$

Ostatní součinitele Marinovy rovnice jsou rovny 1. Neuvažoval se ani součinitel spolehlivosti k_e , protože konstrukce bude jen zřídka namáhána maximálním provozním tlakem 200 bar. Nyní bylo už možné podle rovnice (12-26) spočítat korigovanou mez únavy držáku reometru.

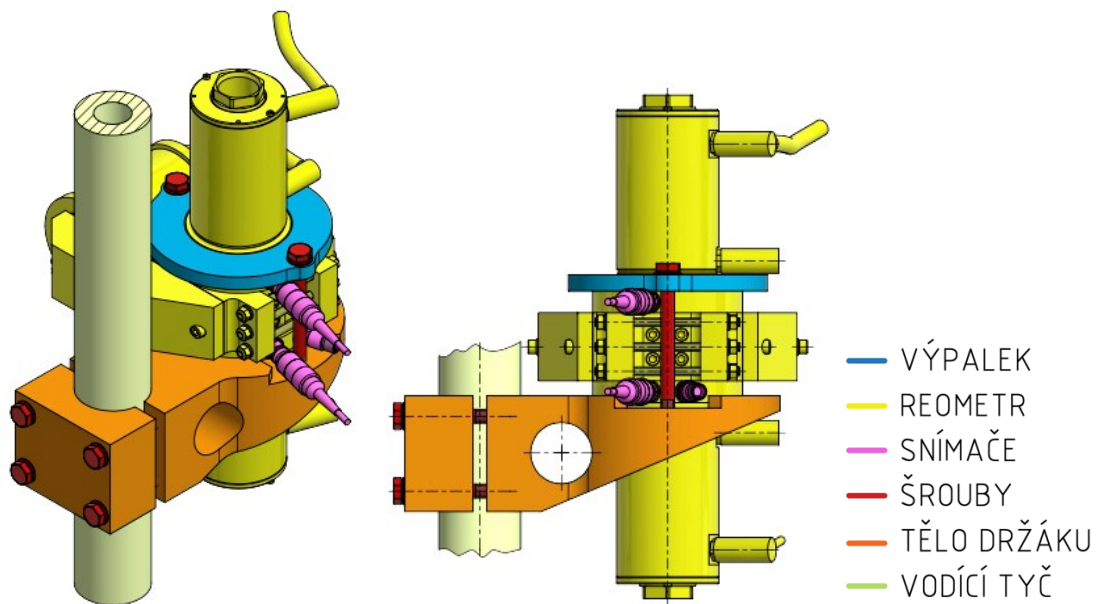
$$\sigma'_{co} = k_a k_b 0,504 Rm = 0,831 \cdot 0,925 \cdot 0,504 \cdot 590 \text{ MPa} = 228 \text{ MPa} \quad (12-26)$$

kde σ'_{co} je korigovaná mez únavy podle Marinovy rovnice v MPa, k_a je součinitel vlivu jakosti povrchu, k_b je součinitel vlivu velikosti tělesa a Rm je mez pevnosti materiálu.

12.3 Příloha 3 – Držák reometru

12.3.1 Příloha 3.1 – Šrouby svěrného spoje

Obrázek 12-7 zobrazuje finální návrh držáku reometru. Tato výpočtová část se věnovala šroubům, konkrétně šroubům svěrného spoje s vodící tyčí a šroubům, které zajišťují reometr v držáku.



Obrázek 12-7 Držák reometru

U šroubů svěrného spoje byla určena potřebná síla jejich předpětí pomocí aplikace v programu Autodesk Inventor Professional 2019 – viz Obrázek 12-8. K volbě vhodného součinitele tření mezi vodící tyčí a držákem se vycházelo z poznatků získaných z jiné práce [9], která se zabývala přímo návrhem rámu hydraulického pulsátoru Inova, na který je nyní pohon reometru také navrhován. V téhle práci byl volen součinitel tření mezi tyčí a svěrným pouzdrem $f = 0,15$ a následně byl výpočet kontrolován pomocí lisu a siloměru na vyrobených součástech. Z výsledků vyplývá, že skutečná únosnost převyšuje tu teoreticky spočítanou přibližně o 19 %, takže je tato volba dostatečně konzervativní. Při výrobě svěrného spoje budou proto dodrženy stejné tolerance a drsnost, jako na součástech, které se použily pro testování.

Výpočet

Typ výpočtu: Kontrolní výpočet

Zatížení

Krouticí moment: $T = 0,001 \text{ N m}$

Axiální síla: $F_a = 15000,000 \text{ N}$

Rozměry

Průměr hřídele: $d = 60 \text{ mm}$

Délka náboje: $L = 85 \text{ mm}$

Vlastnosti spoje

Způsob zatížení: Střídavé zatížení

Materiál

Vlastní

Dovolený tlak: $p_A = 100,000 \text{ MPa}$

Souč. sevření: $v = 0,150 \text{ ul}$

Součinitel bezpečnosti proti skluzu: $k_s = 2 \text{ ul}$

Vlastnosti šroubu

Materiál

Vlastní

Dovolený tlak ($0,25 * S_y$): $p_A = 270 \text{ MPa}$

Počet spojovacích šroubů: $N = 4,000 \text{ ul}$

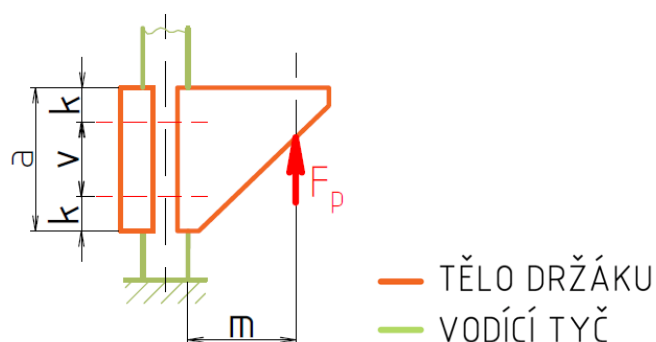
Výsledky

l_{Min}	10,610 mm
p_{Ac}	12,483 MPa
M_{Min}	10,000 mm
F_i	15915,494 N

Obrázek 12-8 Výpočet svěrného spoje v Autodesk Inventoru Professional 2019

Pro co nejjednodušší montáž na vodící tyč byly zvoleny pouze čtyři šrouby ve svěrném spoji. Ve výpočtové aplikaci je součinitel tření pojmenován jako součinitel sevření. Při výpočtu bylo zohledněno střídavé zatěžování silou lineárního aktuátoru $F_p = 15 \text{ kN}$ a součinitel bezpečnosti proti skluzu byl zvolen na hodnotu 2. Hlavním výsledkem tohoto výpočtu je potřebná síla předpětí jednoho šroubu, se kterou se bude dále pracovat. Jedná se o zvýrazněnou sílu $F_i = 15,9 \text{ kN}$.

Šrouby svěrného spoje nebudou během provozu namáhány pouze potřebnou silou jejich předpětí. Kvůli pozici, ve které tlačí lineární aktuátor na reometr v držáku, vznikne moment – viz Obrázek 12-9. Tento moment bude mít vliv na zatížení šroubů, protože ho šrouby musí zachytit. V závislosti na směru protlačení budou vždy dva šrouby více zatěžovány než zbylé dva [36] (tzn. buď dvojice šroubů v horní řadě, nebo dvojice šroubů ve spodní řadě). Během měření se směry zatěžování pravidelně mění.



Obrázek 12-9 Schématické zobrazení držáku při protlačení směrem nahoru

Vzniklý moment M se vypočítá podle rovnice (12-27) na základě maximálního provozního zatížení F_p (viz kapitola 5.1) a ze známé geometrie těla držáku. Rozměr m byl určen s ohledem na rozměry reometru tak, aby byl co nejmenší, a díky tomu je vzniklý moment také co nejmenší.

$$M = F_p m = (15\,000 \text{ N}) \cdot 0,108 \text{ m} = 1\,620 \text{ Nm} \quad (12-27)$$

kde M je ohybový moment v Nm, F_p je síla lineárního aktuátoru v N a m je vzdálenost osy lineárního aktuátoru od osy vodící tyče v m.

Poloha šroubů svěrného spoje má vliv na to, jak moc budou tyto šrouby namáhány při zachycování vzniklého momentu. Obecně je možné říci, že čím blíže jsou šrouby okrajům svěrného spoje (rozměr u , viz Obrázek 12-9), tím menší zatížení na ně bude působit. Naopak při vzdalování šroubů od okraje svěrného spoje roste zatěžující síla až do okamžiku, kdy $u = 25 \text{ mm}$, odkud začne zatížení znovu klesat. Je vhodné na obou stranách svěrného spoje uvažovat stejnou vzdálenost šroubů od jeho okraje, protože při pravidelné změně směru zatížení budou vzniklá maxima vždy stejná buď na horní dvojici šroubů, nebo na spodní dvojici šroubů.

Na základě několika iterací byla zvolena hodnota $u = 15$ mm, protože umožňuje nejnižší zatížení šroubů. Stejně hodnoty je možné dosáhnout pro $u = 33$ mm, ale v tomto případě by už byly šrouby příliš blízko sebe. Délka svěrného spoje (rozměr a , viz Obrázek 12-9) byla určena na základě strukturální analýzy s ohledem na tuhost držáku. Dva šrouby v řadě reprezentuje ve výpočtu parametr i_s . V rovnici (12-28) byl proveden výpočet maximální vzniklé síly F_{sx} , která působí na jeden šroub svěrného spoje vlivem zachycení vzniklého momentu M .

$$F_{sx} = \frac{M(a - k)}{i_s(2k^2 + 2kv + v^2)} = \quad (12-28)$$

$$= \frac{1\,620 \text{ Nm} (0,085 - 0,015) \text{ m}}{2 \cdot [2(0,015 \text{ m})^2 + 2(0,015 \cdot 0,055) \text{ m} + (0,055 \text{ m})^2]} = 11\,064 \text{ N}$$

kde F_{sx} je přírůstek síly ve šroubu vlivem ohybového momentu v N, M je ohybový moment v Nm, a je výška těla držáku v m, k je vzdálenost šroubů svěrného spoje od okraje těla držáku v m, i_s je počet sloupců se šrouby svěrného spoje a v je osová vzdálenost mezi šrouby svěrného spoje v m.

Pro výpočet celkového největšího namáhá šroubů svěrného spoje bylo nutné sečíst jak potřebnou sílu předpětí F_i (viz Obrázek 12-8), tak sílu vzniklou zachycením momentu F_{sx} (rovnice (12-28)). Na základě této hodnoty spočítané v rovnici (12-29) se počítal potřebný průřez šroubů.

$$F_s = F_i + F_{sx} = (15\,916 + 11\,064) \text{ N} = 26\,980 \text{ N} \quad (12-29)$$

kde F_s je největší síla, kterou je šroub namáhán v N, F_i je síla předpětí šroubu v N a F_{sx} je přírůstek síly vlivem ohybového momentu v N.

Ve svěrném spoji se uvažovaly šrouby pevnostní třídy 12.9. Minimální mez kluzu v tahu Re těchto šroubů se určila podle rovnice (12-30). Minimální mez pevnosti v tahu Rm těchto šroubů je dána první číslicí v třídě pevnosti šroubů: $Rm = 1\,200$ MPa.

$$Re = 0,9Rm = 0,9 \cdot 1\,200 \text{ MPa} = 1\,080 \text{ MPa} \quad (12-30)$$

Ze známého největšího zatížení šroubů F_s a ze známé meze kluzu Re se podle rovnice (12-31) vypočítal potřebný minimální výpočtový průřez šroubu A_s . Ten byl následně zvětšen kvůli bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu pružnosti šroubu při utahování – viz rovnice (12-40). Zvětšená hodnota průřezu odpovídá šroubu M10 x 1,5.

$$A_s = \frac{F_s}{Re} = \frac{26\,980 \text{ N}}{1\,080 \text{ MPa}} = 24,98 \text{ mm}^2 \rightarrow 58 \text{ mm}^2 \quad (12-31)$$

kde A_s je výpočtový průřez šroubu v mm^2 , F_s je největší síla, kterou je šroub namáhán v N a Re je mez kluzu v MPa.

Maximální tahové napětí σ v jednom šroubu svěrného spoje bude při maximálním provozním zatížení 15 kN a známém průřezu šroubu A_s odpovídat hodnotě spočítané v rovnici (12-32).

$$\sigma = \frac{F_s}{A_s} = \frac{26\,980\text{ N}}{58\text{ mm}^2} = 465,2\text{ MPa} \quad (12-32)$$

kde σ je napětí v tahu v MPa, F_s je největší síla, kterou je šroub namáhán v N a A_s je výpočtový průřez šroubu v mm^2 .

Ze známé meze kluzu Re a maximálního napětí ve šroubu σ bylo možné jednoduše spočítat bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti k_{msp} podle rovnice (12-33).

$$k_{msp} = \frac{Re}{\sigma} = \frac{1\,080\text{ MPa}}{465,2\text{ MPa}} = 2,3 \quad (12-33)$$

K určení utahovacího momentu pro vyvození požadovaného předpětí šroubů bylo potřeba udělat ještě několik mezi výpočtů. Tím prvním je přepočítání úhlu stoupání ψ závitů na radiány – viz rovnice (12-34). Používá se závit M10 x 1,5, potřebné rozměry je proto možné snadno dohledat ve strojnických tabulkách – jedná se především o stoupání závitu s a o střední průměr d_2 .

$$\psi = \frac{s}{\pi d_2} = \frac{1,5\text{ mm}}{\pi \cdot 9,026\text{ mm}} = 0,053\text{ rad} \quad (12-34)$$

kde ψ je úhel stoupání v rad, s je stoupání závitu v mm a d_2 je střední průměr závitu v mm.

Dalším krokem k určení potřebného utahovacího momentu byl výpočet součinitele utahovacího momentu K [36] – viz rovnice (12-35). Vnější průměr závitu d je stejně jako jeho střední průměr d_2 možné snadno dohledat v tabulkách. Při výpočtu byly důležité součinitele tření, jednalo se konkrétně o součinitel tření v závitech f_s a o součinitel tření ve stykové ploše hlavy šroubu f_0 . Jejich hodnota byla zvolena na základě internetového zdroje [35].

$$K = \frac{d_2}{2d} \left(\frac{\text{tg } \psi + \frac{f_s}{\cos \frac{\alpha}{2}}}{1 - \frac{f_s \text{tg } \psi}{\cos \frac{\alpha}{2}}} \right) + 0,625 f_0 = \quad (12-35)$$

$$= \frac{9,026\text{ mm}}{2 \cdot 10\text{ mm}} \left(\frac{\text{tg}(0,053\text{ rad}) + \frac{0,23}{\cos \frac{1,047\text{ rad}}{2}}}{1 - \frac{0,23 \cdot \text{tg}(0,053\text{ rad})}{\cos \frac{1,047\text{ rad}}{2}}} \right) + 0,625 \cdot 0,2 = 0,254$$

kde K je součinitel utahovacího momentu, d_2 je střední průměr závitu v mm, d je velký průměr závitu v mm, ψ je úhel stoupání v rad, f_s je součinitel tření v závitech, α je úhel profilu závitu v rad a f_0 je součinitel tření ve stykové ploše hlavy šroubu.

Nyní už bylo možné dopočítat potřebnou velikost utahovacího momentu M_u šroubů svěrného spoje podle rovnice (12-36). Vypočítaná hodnota se zaokrouhlila kvůli možnosti nastavení na momentovém klíči.

$$M_u = KF_i d = 0,254 \cdot 15\,916 \text{ N} \cdot 0,010 \text{ m} = 40,5 \text{ Nm} \rightarrow 41 \text{ Nm} \quad (12-36)$$

kde M_u je utahovací moment v Nm, K je součinitel utahovacího momentu, F_i je síla předpětí šroubů v N a d je velký průměr závitu v mm.

Jako jeden z posledních kroků se provedla kontrola šroubu při jeho utahování. Ze známého utahovacího momentu M_u a ze známých rozměrů šroubů bylo možné jednoduše spočítat napětí vzniklé vlivem utahovacího momentu τ (rovnice (12-37)). Stejně tak bylo možné podle rovnice (12-38) vypočítat tahové napětí σ ve šroubu vzniklé jeho předepnutím. Vlivem zaokrouhlení utahovacího momentu byla v tomto výpočtu upravena síla předpětí podle vztahu v rovnici (12-36), tzn. $F_i = M_u / (Kd)$. Nakonec bylo možné podle napětí ve šroubu od krutu τ i od axiální síly σ vypočítat redukované napětí σ_{red} podle rovnice (12-39).

$$\tau = \frac{M_u}{W_k} = \frac{16M_u}{\pi d_3^3} = \frac{16 \cdot 41 \text{ Nm}}{\pi(0,007938 \text{ m})^3} \cdot 10^{-6} = 417,5 \text{ MPa} \quad (12-37)$$

kde τ je napětí v krutu v MPa, M_u je utahovací moment v Nm, W_k je modul průřezu v krutu v m^3 , d_3 je malý průměr závitu v m.

$$\sigma = \frac{F_i}{A_s} = \frac{M_u}{KdA_s} = \frac{41 \text{ Nm}}{0,254 \cdot 0,01 \text{ m} \cdot 58 \text{ mm}^2} = 278 \text{ MPa} \quad (12-38)$$

kde F_i je síla předpětí šroubů v N, A_s je výpočtový průřez závitové tyče v mm^2 , M_u je utahovací moment v Nm, K je součinitel utahovacího momentu, d je velký průměr závitu v m a A_s je výpočtový průřez šroubu v mm^2 .

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(278 \text{ MPa})^2 + 3(417,5 \text{ MPa})^2} = 774,7 \text{ MPa} \quad (12-39)$$

kde σ_{red} je redukované napětí v MPa, σ je napětí v tahu v MPa a τ je napětí v krutu v MPa.

Na základě redukovaného napětí σ_{red} a ze známé meze kluzu materiálu Re bylo možné spočítat podle rovnice (12-40) bezpečnost šroubu vzhledem k meznímu stavu pružnosti k_{msp} během utahování na požadované předpětí.

$$k_{\text{msp}} = \frac{Re}{\sigma_{\text{red}}} = \frac{1\,080 \text{ MPa}}{774,7 \text{ MPa}} = 1,39 \quad (12-40)$$

Ze známého maximálního zatížení šroubů F_s a z jejich zvolené pevnostní třídy bylo možné jednoduše spočítat podle rovnice (12-41) minimální potřebný počet nosných závitů pro dané zatížení. Střední průměr závitu d_2 a jeho nosnou hloubku H_1 je možné jednoduše určit na základě strojnických tabulek [34]. Dovolенý tlak v závitech p_{dov} záleží na pevnostní třídě šroubu a na materiálu matice, je možné jej také určit ze strojnických tabulek [34].

$$z = \frac{F_s}{\pi d_2 H_1 p_{dov}} = \frac{26\,980\text{ N}}{\pi(9,026 \cdot 0,796)\text{ mm} \cdot 250\text{ MPa}} = 4,78 \rightarrow 6 \quad (12-41)$$

kde z je minimální potřebný počet závitů, F_s je největší síla, kterou je šroub namáhán v N, d_2 je střední průměr závitu v mm, H_1 je nosná hloubka závitu v mm a p_{dov} je dovolený tlak v MPa.

Vzhledem ke stoupání závitu $s = 1,5$ mm je potřebná minimální hloubka zašroubování jednoho šroubu dána rovnicí (12-42).

$$h_s = zs = 6 \cdot 1,5\text{ mm} = 9\text{ mm} \quad (12-42)$$

kde h_s je potřebná minimální hloubka zašroubování v mm, z je minimální potřebný počet závitů a s je stoupání závitu v mm.

Dále se kontrolovalo napětí vzniklé ohybem závitů v těle držáku. Jelikož je známé maximální provozní zatížení jednoho šroubu F_s a také další prvky, jako nosná hloubka závitu H_1 a jeho rozměry, bylo možné tuto kontrolu provést podle rovnice (12-43). Výpočet vychází z minimální hloubky zašroubování (viz rovnice (12-42)), ve skutečnosti bude tato hloubka větší. Uvažovalo se rovnoměrné rozdělení mezi všechny závity.

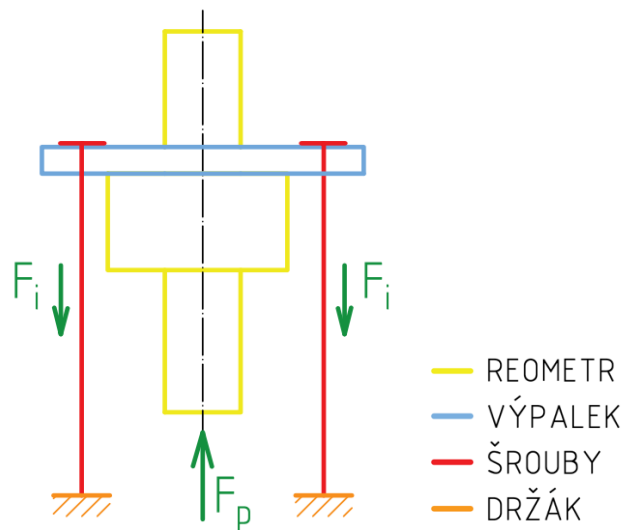
$$\sigma_o = \frac{3F_s H_1}{\pi D_1 a_s^2 z} = \frac{3 \cdot (26\,980\text{ N}) \cdot 0,796\text{ mm}}{\pi \cdot 8,376\text{ mm} \cdot (1,5\text{ mm})^2 \cdot 6} = 181\text{ MPa} \quad (12-43)$$

kde F_s je největší síla, kterou je šroub namáhán v N, H_1 je nosná hloubka závitu v mm, D_1 je malý průměr matice v mm, z je minimální potřebný počet závitů a a_s je tloušťka paty zubu v mm.

12.3.2 Příloha 3.2 – Šrouby jistící reometr v držáku

Obrázek 12-10 poskytuje pohled na schématické znázornění reometru uloženého v držáku. Je vidět, že výpalek, který ho přitlačí k tělu držáku, je s držákem spojen pomocí dvou šroubů. Tyto dva šrouby byly předmětem výpočtu v téhle výpočtové části. Jak již bylo zmíněno dříve, šrouby na celém pohonu budou stejného typu a stejné velikosti. Díky tomu se zjednoduší práce se zařízením, protože k montáži nebo demontáži postačí pouze jeden nástroj. Ve výpočtech šroubů svěrného spoje se určila potřebná velikost M10. Proto budou použity i v této výpočtové části a výpočet byl soustředěn pouze na jejich kontrolu.

Šrouby byly umístěny symetricky vzhledem k zatěžující síle od lineárního aktuátoru F_p , aby se na ně tato síla rovnoměrně rozložila. Díky tomu budou jak šrouby, tak tělo držáku rovnoměrně zatěžovány. Oba šrouby jsou předepnuty silou F_i .



Obrázek 12-10 Schematicky znázorněné upevnění reometru v držáku pomocí výpalku a šroubů

Maximální provozní zatížení celého zařízení bylo určeno v kapitole 5.1 na hodnotu $F_p = 15$ kN. Předpětí jednoho šroubu proto musí být alespoň 7,5 kN, aby při protlačení kapaliny v reometru směrem dolů nevznikla vůle mezi výpalkem a šrouby. Oba dva šrouby budou předepnuty na zvolenou hodnotu $F_i = 9$ kN. Následující výpočet slouží pouze k ověření, že rozměr závitu spočítaný v předchozí kapitole postačuje i pro tuto aplikaci.

Opět se uvažovaly šrouby pevnostní třídy 12.9, tzn. mez kluzu Re je dána opět rovnicí (12-30) a její velikost je $Re = 1080$ MPa. Každý šroub bude předepnut již zmíněnou silou $F_i = 9$ kN a nejvíce zatížený bude v okamžiku protlačení kapaliny směrem nahoru. Díky symetrickému umístění obou šroubů se maximální provozní síla F_p rovnoměrně rozloží na oba šrouby. Největší namáhání jednoho šroubu F_s je možné jednoduše spočítat podle rovnice (12-44).

$$F_s = F_i + \frac{F_p}{2} = 9 \text{ kN} + \frac{15 \text{ kN}}{2} = 16,5 \text{ kN} \quad (12-44)$$

kde F_s je největší síla, kterou je šroub namáhán v N, F_i je síla předpětí šroubu v N a F_p je síla lineárního aktuátoru v N.

Napětí σ v jednom šroubu spoje bude při maximálním provozním zatížení 16,5 kN a známém výpočtovém průřezu šroubu A_s odpovídat hodnotě spočítané v rovnici (12-45).

$$\sigma = \frac{F_s}{A_s} = \frac{16\,500 \text{ N}}{58 \text{ mm}^2} = 284,48 \text{ MPa} \rightarrow 285 \text{ MPa} \quad (12-45)$$

kde σ je napětí v tahu v MPa, F_i je síla předpětí šroubů v N a A_s je výpočtový průřez šroubu v mm^2 .

Ze známé meze kluzu Re a maximálního napětí ve šroubu σ bylo možné jednoduše spočítat bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti k_{msp} podle rovnice (12-46).

$$k_{msp} = \frac{Re}{\sigma} = \frac{1\,080\text{ MPa}}{285\text{ MPa}} = 3,79 \quad (12-46)$$

Výpočet potřebného utahovacího momentu M_u pro předepnutí jednoho šroubu na sílu $F_i = 9\text{ kN}$ je dán rovnicí (12-47). Opět se zde využíval součinitel utahovacího momentu K , který už byl spočítán v rovnici (12-35) a je stejný i pro tento výpočet, stejně jako průměr šroubu d .

$$M_u = KF_i d = 0,254 \cdot 9\,000\text{ N} \cdot 0,010\text{ m} = 22,9\text{ Nm} \rightarrow 23\text{ Nm} \quad (12-47)$$

kde M_u je utahovací moment v Nm, K je součinitel utahovacího momentu, F_i je síla předpětí šroubů v N a d je velký průměr závitu v mm.

Stejně jako v předchozím výpočtu, i v tomto se provedla kontrola šroubu během jeho utahování. Cílem bylo získat jak napětí τ vzniklé vlivem utahovacího momentu (viz rovnice (12-48)), tak i tahové napětí σ ve šroubu vzniklé vlivem jeho předepnutím. Nakonec bylo možné podle napětí ve šroubu od krutu τ i od axiální síly σ vypočítat redukované napětí σ_{red} podle rovnice (12-50) pro výpočet bezpečnosti.

$$\tau = \frac{M_u}{W_k} = \frac{16M_u}{\pi d_3^3} = \frac{16 \cdot 23\text{ Nm}}{\pi(0,007938\text{ m})^3} \cdot 10^{-6} = 234,2\text{ MPa} \quad (12-48)$$

kde τ je napětí v krutu v MPa, M_u je utahovací moment v Nm, W_k je modul průřezu v krutu v m^3 a d_3 je malý průměr závitu v m.

$$\sigma = \frac{F_i}{A_s} = \frac{M_u}{KdA_s} = \frac{23\text{ Nm}}{0,254 \cdot 0,01\text{ m} \cdot 58\text{ mm}^2} = 156,1\text{ MPa} \quad (12-49)$$

kde σ je napětí v tahu v MPa, F_i je síla předpětí šroubů v N a A_s je výpočtový průřez šroubu v mm^2 .

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(156,1\text{ MPa})^2 + 3(234,2\text{ MPa})^2} = 436,7\text{ MPa} \quad (12-50)$$

kde σ_{red} je redukované napětí v MPa, σ je napětí v tahu v MPa a τ je napětí v krutu v MPa.

Na základě redukovaného napětí σ_{red} a ze známé meze kluzu materiálu Re bylo možné spočítat podle rovnice (12-51) bezpečnost šroubu vzhledem k meznímu stavu pružnosti k_{msp} během utahování na požadované předpětí.

$$k_{\text{msp}} = \frac{Re}{\sigma_{\text{red}}} = \frac{1\,080 \text{ MPa}}{436,7 \text{ MPa}} = 2,47 \quad (12-51)$$

Je vidět, že bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti vyšla poměrně vysoká. To je dáno zejména tím, že se zachoval šroub M10 z předchozího výpočtu, aby byly na celém pohonu stejné.

Ze známého maximálního zatížení šroubů F_s a z jejich zvolené pevnostní třídy bylo možné jednoduše spočítat podle rovnice (12-41) minimální potřebný počet nosných závitů pro dané zatížení. Střední průměr závitu d_2 a jeho nosnou hloubku H_1 je možné jednoduše určit na základě strojnických tabulek [34]. Dovolенý tlak v závitech p_{dov} záleží na pevnostní třídě šroubu a na materiálu matice, je možné jej také určit ze strojnických tabulek [34].

$$z = \frac{F_s}{\pi d_2 H_1 p_{\text{dov}}} = \frac{16\,500 \text{ N}}{\pi \cdot (9,026 \cdot 0,796) \text{ mm} \cdot 250 \text{ MPa}} = 2,92 \rightarrow 4 \quad (12-52)$$

kde z je minimální potřebný počet závitů, F_s je největší síla, kterou je šroub namáhán v N, d_2 je střední průměr závitu v mm, H_1 je nosná hloubka závitu v mm a p_{dov} je dovolený tlak v MPa.

Vzhledem ke stoupání závitu $s = 1,5$ mm je potřebná minimální hloubka zašroubování jednoho šroubu dána rovnicí (12-42).

$$h_s = zs = 4 \cdot 1,5 \text{ mm} = 6 \text{ mm} \quad (12-53)$$

kde h_s je potřebná minimální hloubka zašroubování v mm, z je minimální potřebný počet závitů a s je stoupání závitu v mm.

12.3.3 Příloha 3.3 – Korigovaná mez únavy materiálu držáku

K výrobě těla držáku byl zvolen nerezový materiál 1.4307 a výpalek se vyrobil z nerezového materiálu 1.4301. Oba tyto materiály mají shodné mechanické vlastnosti – viz materiálový list v externích přílohách téhle práce (příloha E1). Tento materiál má dobré mechanické vlastnosti, výbornou houževnatost, je dobře obrobitelný a odolný proti atmosférické korozi.

Na základě materiálového listu má materiál mez pevnosti $Rm = 574$ MPa a mez kluzu $R_{p0,2} = 276$ MPa. Pro výpočet korigované meze únavy se využila Marinova rovnice (12-54). Pro výpočet bylo potřeba nejprve určit součinitele v téhle rovnici.

$$\sigma'_{\text{co}} = k_a k_b k_c k_d k_e k_f 0,504 Rm \quad (12-54)$$

kde σ'_{co} je korigovaná mez únavy podle Marinovy rovnice v MPa, k_a je součinitel vlivu jakosti povrchu, k_b je součinitel vlivu velikosti tělesa, k_c je součinitel vlivu způsobu zatěžování, k_d je součinitel vlivu teploty, k_e je součinitel spolehlivosti, k_f je součinitel zahrnující další vlivy a Rm je mez pevnosti materiálu v MPa.

Součinitel vlivu jakosti povrchu k_a se počítá podle rovnice (12-55). Součinitel a_c a exponent b_c byly voleny na základě technologie, kterou se dokončuje povrch – viz strana 346 v [36].

$$k_a = a_c Rm^{b_c} = 4,51 \cdot (574 \text{ MPa})^{-0,265} = 0,838 \quad (12-55)$$

Součinitel vlivu velikosti tělesa k_b se počítá podle rovnice (12-57). Jelikož se jedná o obdélníkový průřez 85 x 104 mm, musí se počítat s efektivním rozměrem d_e podle rovnice (12-56).

$$d_e = 0,808 \sqrt{b_t h_t} = 0,808 \sqrt{(0,085 \text{ m} \cdot 0,104 \text{ m})} = 0,076 \text{ m} \quad (12-56)$$

kde d_e je efektivní rozměr pro nekruhové průřezy v m a b_t a h_t je šířka a tloušťka průřezu těla držáku v m.

$$k_b = 1,51 d_e^{-0,157} = 1,51 (76 \text{ mm})^{-0,157} = 0,765 \quad (12-57)$$

Ostatní součinitele Marinovy rovnice jsou rovny 1. Neuvažoval se ani součinitel spolehlivosti k_e , protože konstrukce bude jen zřídka namáhána maximálním provozním zatížením 15 kN. Nyní bylo už možné podle rovnice (12-58) spočítat korigovanou mez únavy držáku reometru.

$$\sigma'_{co} = k_a k_b 0,504 Rm = 0,838 \cdot 0,765 \cdot 0,504 \cdot 574 \text{ MPa} = 185 \text{ MPa} \quad (12-58)$$

kde σ'_{co} je korigovaná mez únavy podle Marinovy rovnice v MPa, k_a je součinitel vlivu jakosti povrchu, k_b je součinitel vlivu velikosti tělesa a Rm je mez pevnosti materiálu.

12.3.4 Příloha 3.4 – Korigovaná mez únavy materiálu výpalku

Materiál výpalku má stejné mechanické vlastnosti, jako materiál těla držáku, ale v Marinově rovnici vystupuje jiný součinitel vlivu velikosti tělesa k_b – viz rovnice (12-59) a (12-60). Pro výpočet součinitele jakosti povrchu k_a není v dostupné literatuře podklad pro povrch vypalovaný na laseru, proto se uvažuje stejný, jako po obrábění (viz rovnice (12-55)).

$$d_e = 0,808 \sqrt{b_v h_v} = 0,808 \sqrt{(0,031 \text{ m} \cdot 0,012 \text{ m})} = 0,0156 \text{ m} \quad (12-59)$$

kde d_e je efektivní rozměr pro nekruhové průřezy v m a b_v a h_v je šířka a tloušťka průřezu výpalku v m.

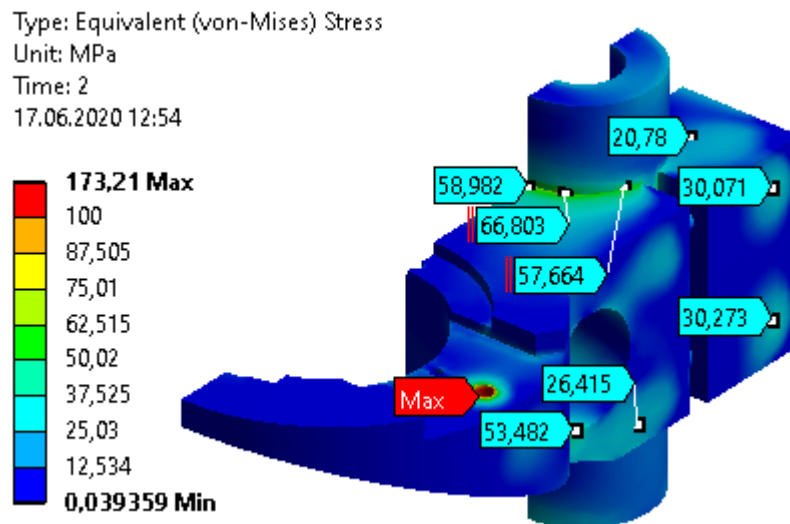
$$k_b = \left(\frac{d_e}{7,62}\right)^{-0,107} = \left(\frac{15,6 \text{ mm}}{7,62}\right)^{-0,107} = 0,926 \quad (12-60)$$

Korigovaná mez únavy pro výpalek se díky známým součinitelům vypočítala podle rovnice (12-61).

$$\sigma'_{co} = k_a k_b 0,504 Rm = 0,838 \cdot 0,926 \cdot 0,504 \cdot 574 \text{ MPa} = 224 \text{ MPa} \quad (12-61)$$

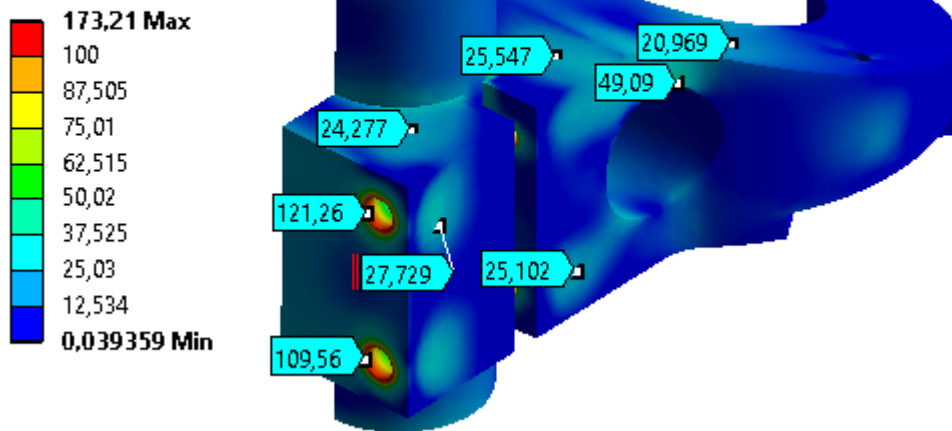
kde σ'_{co} je korigovaná mez únavy podle Marinovy rovnice v MPa, k_a je součinitel vlivu jakosti povrchu, k_b je součinitel vlivu velikosti tělesa a Rm je mez pevnosti materiálu.

12.3.5 Příloha 3.5 – Napětí v těle držáku při protlačení směrem nahoru



Obrázek 12-11 Protlačování směrem nahoru, pohled na napětí v horní části držáku

Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 2
 17.06.2020 12:55



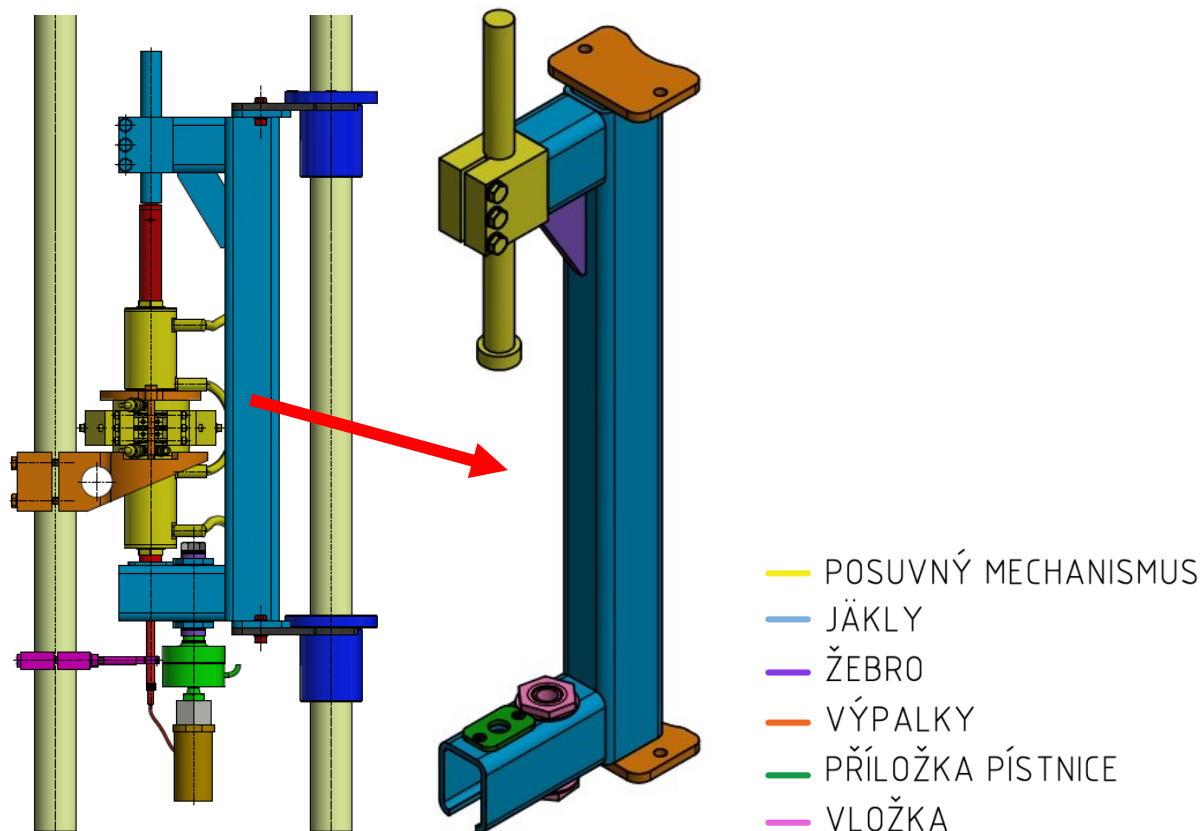
Obrázek 12-12 Protlačování směrem nahoru, pohled na napětí ve spodní části držáku

	Equivalent Stress (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	153,35		111602	34331
2	173,21	12,166	110219	58681

Obrázek 12-13 Konvergence výpočtu napětí

12.4 Příloha 4 – Rám pohonu reometru

Tato výpočtová část se věnovala analytické kontrole tyče ve svěrném spoji vzhledem k meznímu stavu vzpěrné stability a následně se ještě provedla kontrola šroubů tohoto svěrného spoje. Obrázek 12-14 zobrazuje finální návrh rámu pohonu.



Obrázek 12-14 Vlevo: celková sestava, vpravo: rám pohonu reometru – jednotlivé části

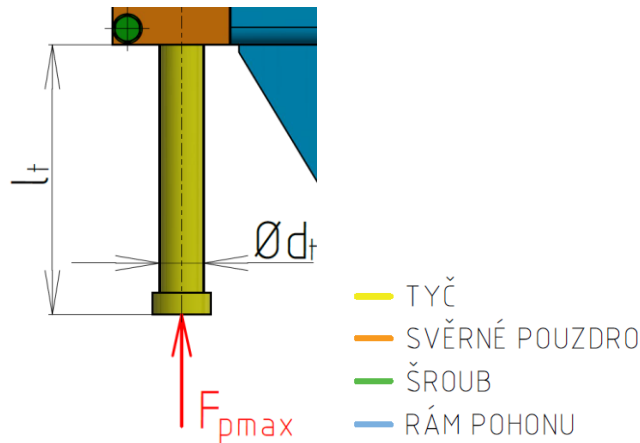
12.4.1 Příloha 4.1 – Návrh tyče s ohledem na mezní stav vzpěrné stability

Tyč v posuvném mechanismu rámu pohonu byla navrhována s ohledem na mezní stav vzpěrné stability při plném provozním zatížení F_p . Při výpočtu byl zvolen návrhový součinitel $k_n = 3$, který zvýší sílu F_{pmax} (viz rovnice (12-62)). Tak vysoká hodnota návrhového součinitele byla zvolena kvůli tomu, aby byl výpočet dostatečně konzervativní. Není totiž možné zajistit, že síla F_{pmax} bude působit přesně v ose tyče, stejně tak se mohou objevit rázy během měření.

$$F_{pmax} = F_p k_n = 15 \text{ kN} \cdot 3 = 45 \text{ kN} \quad (12-62)$$

kde F_{pmax} je síla lineárního aktuátoru zvýšená o návrhový součinitel v N, F_p je síla lineárního aktuátoru v N a k_n je návrhový součinitel.

Cílem tohoto výpočtu bylo určit a ověřit potřebný průměr tyče d_t , aby měla dostatečnou štíhlost a nehrozilo tak dosažení mezního stavu vzpěrné stability. S ohledem na různé objemy kapaliny v reometru bude tyč i různě vysunuta, přičemž největší možná délka vysunutí je $l = 290 \text{ mm}$. Tyč má jeden konec volný a druhý konec vetknutý, což odpovídá součiniteli $\alpha_v = 1/4$ podle tabulky v [36] na straně 234. Zatěžování tyče zobrazuje Obrázek 12-15.



Obrázek 12-15 Namáhání tyče

Výpočet potřebného průměru tyče byl proveden v rovnici (12-63). Jedná se o upravený vztah pro výpočet kritické síly podle Eulera. Youngův modul pro ocel $E = 207 \text{ GPa}$ podle [36].

$$d_t = \sqrt[4]{\frac{64F_{p\max}l_t^2}{\pi^3\alpha_v E}} = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot 45000 \text{ N} \cdot (0,29 \text{ m})^2}{\pi^3 \cdot 0,25 \cdot (207 \cdot 10^9) \text{ Pa}}} \cdot 10^3 = 19,7 \text{ mm} \rightarrow 30 \text{ mm} \quad (12-63)$$

kde d_t je průměr tyče v m, $F_{p\max}$ je síla lineárního aktuátoru zvýšená o návrhový součinitel v N, l_t je délka tyče v m, α_v je součinitel pro vzpěr tyče a E je Youngův modul v Pa.

Vypočítaný průměr byl zvýšen na hodnotu $d_t = 30 \text{ mm}$ kvůli konzervativnosti výpočtu. Hrozí totiž, že síla nebude na tyč působit přesně v její ose, dále osa tyče a nositelka síly nemusí být vlivem montážních a výrobních nepřesností rovnoběžné. Proto se průměr zvýšil oproti spočítané hodnotě, aby tyč nemohla způsobit během používání žádné problémy.

V rovnici (12-64) je určen mezní štíhlostní poměr tyče, který pomůže rozhodnout, jestli se její maximální únosnost při délce l_t a průměru d_t bude kontrolovat vzhledem k Eulerovu vztahu, nebo k Johnsovu. V tomto výpočtu se vyskytuje mez kluzu materiálu Re , Youngův modul E a součinitel α , který závisí na uložení tyče.

$$\left(\frac{l_t}{i}\right)_1 = \sqrt{\frac{2\pi^2\alpha_v E}{Re}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot 0,25 \cdot (207 \cdot 10^9) \text{ Pa}}{235 \cdot 10^6 \text{ Pa}}} = 65,9 \quad (12-64)$$

kde l_t je délka tyče v m, i je poloměr osového kvadratického momentu v m, α_v je součinitel pro vzpěr tyče, E je Youngův modul v Pa a Re je mez kluzu materiálu v Pa.

Skutečný štíhlostní poměr tyče byl spočítán v rovnici (12-71). Je vidět, že pro kruhový průřez záleží pouze na délce l a průměru d_t . Poloměr osového kvadratického momentu i je pro kruhovou tyč: $i = d_t/4$.

$$\frac{l_t}{i} = \frac{l_t}{0,25d_t} = \frac{0,29 \text{ m}}{0,25 \cdot 0,03 \text{ m}} = 38,67 \quad (12-65)$$

kde l_t je délka tyče v m, i je poloměr osového kvadratického momentu v m a d_t je průměr tyče v m.

Jelikož je skutečný štiřlostní poměr menší, než mezní štiřlostní poměr, musí se únosnost tyče kontrolovat podle Johnsova vztahu – viz rovnice (12-72).

$$F_{kr} = \frac{\pi d_t^2}{4} \left[Re - \left(\frac{Re l_t}{2\pi i} \right)^2 \frac{1}{\alpha_v E} \right] = \frac{\pi(0,03 \text{ m})^2}{4} [(235 \cdot 10^6 \text{ Pa}) - \quad (12-66)$$

$$- \left(\frac{(235 \cdot 10^6 \text{ Pa}) \cdot 0,29 \text{ m}}{2\pi \cdot 0,25 \cdot 0,03 \text{ m}} \right)^2 \frac{1}{0,25 \cdot 207 \cdot 10^9 \text{ Pa}}] = 137,5 \text{ kN}$$

kde F_{kr} je kritická hodnota síly v N, d_t je průměr tyče v m, Re je mez kluzu materiálu v Pa, l_t je délka tyče v m, i je poloměr osového kvadratického momentu v m, α_v je součinitel pro vzpěr tyče a E je Youngův modul v Pa.

Bezpečnost tyče je i při návrhovém součiniteli $k_n = 3$ dostatečná – viz rovnice (12-67):

$$k_v = \frac{F_{kr}}{F_{pmax}} = \frac{137,5 \text{ kN}}{45 \text{ kN}} = 3,06 \quad (12-67)$$

kde k_v je bezpečnost tyče k meznímu stavu vzpěrné stability, F_{kr} je kritická hodnota síly v N a F_{pmax} je síla lineárního aktuátoru zvýšená o návrhový součinitel v N.

12.4.2 Příloha 4.2 – Výpočet šroubů svěrného spoje rámu pohonu

Svěrný spoj posuvného mechanismu je umístěn v horní části rámu pohonu a umožňuje jednoduché a rychlé nastavení požadované polohy tyče. Pro výpočet šroubů zajišťujících dostatečné předpětí byla opět použita aplikace v programu Autodesk Inventor Professional 2019 – viz Obrázek 12-16.

Výpočet

Typ výpočtu: **Kontrolní výpočet**

Zatížení

Krouticí moment T 0,001 N m

Axiální síla F_a 15000,000 N

Deformační síla F_d 10015,287 N

Rozměry

Průměr hřídele d 30,000 mm

Délka náboje L 80 mm

Vnější průměr náboje D 62,000 mm

Tloušťka náboje s 16 mm

Rozteče

b 37 mm

c 15 mm

Uvažován vliv deformace

Označení H8/h9 Změnit...

Mezní úchytky

Zvolit vlastní

ES 0,033 m / es 0,000 m

EI 0,000 m / ei -0,052 r

Max. montážní vůle 0,085 m

Vlastnosti šroubu

Materiál Vlastní

Dovolený tlak ($0,25 \cdot S_y$) p_A 250 MPa

Počet spojovacích šroubů N 3 ul

Vlastnosti spoje

Způsob zatížení Míjivé zatížení

Materiál Vlastní

Dovolený tlak p_A 160,000 MPa

Modul pružnosti v tahu E 210000,000 MPa

Souč. sevření v 0,15 ul

Součinitel bezpečnosti proti skluzu k_s 3 ul

Výsledky

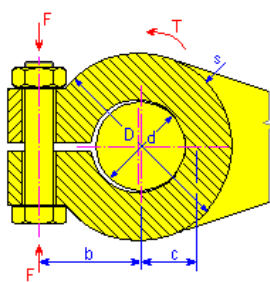
l_{Min} 19,894 mm

p_{Ac} 39,789 MPa

M_{Min} 8,000 mm

F 9182,016 N

F_c 12520,445 N



Obrázek 12-16 Výpočet svěrného spoje v Autodesk Inventoru Professional 2019

Ve výpočtu byla nastavena maximální hodnota provozního axiálního zatížení 15 kN a zadaly se takové rozměry, které odpovídají vnějším rozměrům profilů. Svěrný spoj totiž kopíruje rozměry horního profilu. Během výpočtu se uvažoval i vliv potřebné deformace svěrného pouzdra, který vznikne vlivem rozměrových tolerancí díry a tyče. Jelikož během měření může docházet k rázům, byl ve výpočtu nastaven součinitel bezpečnosti proti prokluzu tyče $k_s = 3$ pro míjivé zatížení. Tak vysoká hodnota zajistí předdimenzování potřebné síly předpětí šroubu F_i .

Z výsledků je vidět, že kontaktní tlak $p_{ac} = 43$ MPa, což je nízká hodnota. Jak již bylo zmíněno dříve, na celém pohonu reometru budou použity stejné šrouby, což pomůže zvýšit uživatelskou přívětivost. Proto se na svěrný spoj použily šrouby M10x1,5, které vyšly už v předchozích výpočtech a pouze se ověří, jestli dokáží vyvodit požadované předpětí $F_i = 12,5$ kN. Opět se uvažují šrouby pevnostní třídy 12.9, výpočet jejich meze kluzu je v rovnici (12-68).

$$R_e = 0,9R_m = 0,9 \cdot 1\,200 \text{ MPa} = 1\,080 \text{ MPa} \quad (12-68)$$

Rovnice (12-69) udává výpočet utahovacího momentu pro vyvození požadovaného předpětí šroubu F_i při průměru šroubu d . Součinitel utahovacího momentu K je možné použít z rovnice (12-35), protože se jedná o stejný šroub šroubovaný do oceli. Vypočítaná hodnota se zaokrouhlila na celé číslo.

$$M_u = KF_i d = 0,254 \cdot 12\,500 \text{ N} \cdot 10 \text{ mm} = 31,75 \text{ Nm} \rightarrow 32 \text{ Nm} \quad (12-69)$$

kde M_u je utahovací moment v Nm, K je součinitel utahovacího momentu, F_i je síla předpětí šroubů v N a d je velký průměr závitu v mm.

Šroub byl kontrolován pouze při utahování, protože to je okamžik, kdy je nejvíce namáhán – viz rovnice (12-70):

$$\tau = \frac{M_u}{W_k} = \frac{16M_u}{\pi d_3^3} = \frac{16 \cdot 32 \text{ Nm}}{\pi(0,007938 \text{ m})^3} \cdot 10^{-6} = 325,8 \text{ MPa} \quad (12-70)$$

kde τ je napětí v krutu v MPa, M_u je utahovací moment v Nm, W_k je modul průřezu v krutu v m^3 , d_3 je malý průměr závitu v m.

Rovnice (12-71) udává výpočet napětí od tahové složky ve šroubu. Kvůli zaokrouhlení utahovacího momentu v rovnici (12-69) bude i vzniklé předpětí šroubu větší, proto byl vztah upraven, aby tuto změnu zohlednil.

$$\sigma = \frac{F_i}{A_s} = \frac{M_u}{KdA_s} = \frac{32 \text{ Nm}}{0,254 \cdot 0,01 \text{ m} \cdot 58 \text{ mm}^2} = 215,5 \text{ MPa} \quad (12-71)$$

kde σ je napětí v tahu v MPa, F_i je síla předpětí šroubů v N a A_s je výpočtový průřez šroubu v mm^2 .

Nakonec se podle rovnice (12-72) vypočítá redukované napětí σ_{red} .

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(215,5 \text{ MPa})^2 + 3(325,8 \text{ MPa})^2} = 604,1 \text{ MPa} \quad (12-72)$$

kde σ_{red} je redukované napětí v MPa, σ je napětí v tahu v MPa a τ je napětí v krutu v MPa.

Bezpečnost šroubů je spočítána v rovnici (12-73) jako podíl meze kluzu Re s redukovaným napětím ve šroubu σ_{red} .

$$k_{\text{msp}} = \frac{Re}{\sigma_{\text{red}}} = \frac{1\,080 \text{ MPa}}{604,1 \text{ MPa}} = 1,79 \quad (12-73)$$

Je vidět, že šroub má poměrně velkou rezervu před dosažením mezního stavu pružnosti. To znamená, že v případě nutnosti se může i více předeprnout, čímž se zvýší únosnost svěrného spoje. Díky tomu se může odladit případný prokluz tyče během rázů.

Nakonec je v rovnici (12-74) spočítán minimální počet závitů pro přenesení síly předpětí šroubu F_i . V rovnici d_2 je střední průměr závitu, H_1 je nosná hloubka závitu a p_{dov} je dovolený tlak, který se získá na základě pevnostní třídy šroubu a materiálu matice podle strojnických tabulek [34]. Závit M10 má stoupání $s = 1,5 \text{ mm}$, takže je minimální hloubka zašroubování 6 mm.

$$z = \frac{F_1}{\pi d_2 H_1 p_{\text{dov}}} = \frac{12\,500 \text{ N}}{\pi(9,026 \cdot 1,031) \text{ mm} \cdot 150 \text{ MPa}} = 3,6 \rightarrow 6 \quad (12-74)$$

kde z je minimální potřebný počet závitů, F_s je největší síla, kterou je šroub namáhán v N, d_2 je střední průměr závitu v mm, H_1 je nosná hloubka závitu v mm a p_{dov} je dovolený tlak v MPa.

12.4.3 Příloha 4.3 – Korigovaná mez únavy materiálu profilu

Rám pohonu reometru byl svařen ze tří dutých profilů s průřezem 80 x 60 x 6 mm. Profily jsou vyrobeny z materiálu S235JRH a další navařené součásti jsou vyrobeny ze stejného materiálu. Tento materiál má minimální mez pevnosti $Rm = 360 \text{ MPa}$ [37]. Postup výpočtu korigované meze únavy je stejný, jako v kapitole 12.3.3.

Součinitel vlivu jakosti povrchu k_a byl spočítán podle rovnice (12-75). Součinitel a_c a exponent b_c byl opět volen podle tabulky v [36] na straně 346.

$$k_a = a_c Rm^{b_c} = 57,7(360 \text{ MPa})^{-0,718} = 0,873 \quad (12-75)$$

Součinitel vlivu velikosti tělesa k_b (viz rovnice (12-88) bylo nutné počítat pomocí efektivního rozměru d_e (viz rovnice (12-76)), protože profily mají obdélníkový průřez.

$$d_e = 0,808 \sqrt{b_p h_p} = 0,808 \sqrt{(0,08 \cdot 0,06) \text{ m}} = 0,056 \text{ m} \quad (12-76)$$

$$k_b = 1,51 d_e^{-0,157} = 1,51(56 \text{ mm})^{-0,157} = 0,803 \quad (12-77)$$

kde d_e je efektivní rozměr pro nekrhové průřezy v m, b_p a h_p je šířka a tloušťka jednotlivých profilů v m.

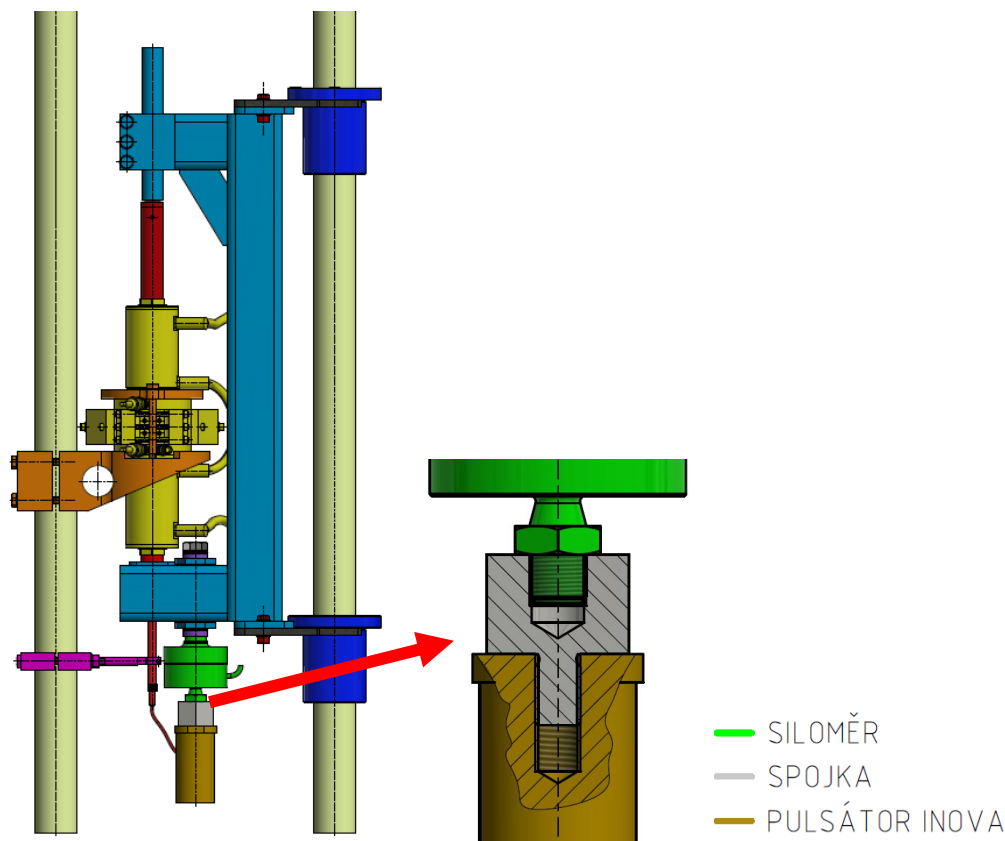
Nakonec se vypočítala korigovaná mez únavy opět podle Marinovy rovnice (12-78).

$$\sigma'_{c_0} = k_a k_b 0,504 Rm = 0,873 \cdot 0,803 \cdot 0,504 \cdot 360 \text{ MPa} = 127 \text{ MPa} \quad (12-78)$$

kde σ'_{c_0} je korigovaná mez únavy podle Marinovy rovnice v MPa, k_a je součinitel vlivu jakosti povrchu, k_b je součinitel vlivu velikosti tělesa a Rm je mez pevnosti materiálu.

12.5 Příloha 5 – Výpočet spojky siloměru s Inovou

Spojka je nutná z toho důvodu, že přípojovací závit na hydraulickém pulsátoru Inova je jiný, než přípojovací závit na siloměru. Obrázek 12-17 zobrazuje umístění spojky v sestavě.



Obrázek 12-17 Spojení siloměru s hydraulickým pulsátorem Inova

12.5.1 Příloha 5.1 – Korigovaná mez únavy materiálu

Pro posouzení bezpečnosti této součásti bylo nutné spočítat nejprve korigovanou mez únavy podle Marinovy rovnice. Postup výpočtu korigované meze únavy je stejný, jako u ostatních součástí. Spojka je vyrobena z houževnatého materiálu E335GC+C s mezí kluzu $Re = 335$ MPa a s mezí pevnosti $Rm = 620$ MPa. Polotovar šestihřanné tyče tažené za studena je možné běžně sehnat vyrobený z tohoto materiálu. Materiál je dobře obrobitelný a houževnatý.

Součinitel vlivu jakosti povrchu k_a byl spočítán podle rovnice (12-79). Součinitel a_c a exponent b_c byl opět volen podle tabulky v [36] na straně 346.

$$k_a = a_c Rm^{b_c} = 4,51(620 \text{ MPa})^{-0,265} = 0,821 \quad (12-79)$$

kde k_a je součinitel vlivu jakosti povrchu a Rm je mez pevnosti materiálu.

Součinitel vlivu velikosti tělesa k_b (viz rovnice (12-80)) bylo možné spočítat na základě průměru nebezpečného místa – tzn. drážky závitu.

$$k_b = 1,24d_d^{-0,107} = 1,24 \cdot (13 \text{ mm})^{-0,107} = 0,942 \quad (12-80)$$

kde k_b je součinitel vlivu velikosti tělesa a d_d je průměr drážky závitu v mm.

Nakonec se vypočítala korigovaná mez únavy podle Marinovy rovnice (12-81).

$$\sigma'_{co} = k_a k_b 0,504 Rm = 0,821 \cdot 0,942 \cdot 0,504 \cdot 620 \text{ MPa} = 241 \text{ MPa} \quad (12-81)$$

kde σ'_{co} je korigovaná mez únavy podle Marinovy rovnice v MPa, k_a je součinitel vlivu jakosti povrchu, k_b je součinitel vlivu velikosti tělesa a Rm je mez pevnosti materiálu.

12.5.2 Příloha 5.2 – Utahovací moment závitu M16x2

K určení utahovacího momentu pro vyvození požadovaného předpětí bylo potřeba udělat několik mezi výpočtů. Postup je stejný, jako pro šrouby na držáku reometru nebo na rámu pohonu. Nejprve se přepočítal úhel stoupání ψ závitu na radiány – viz rovnice (12-82). Připojovací závit na hydraulický pulsátor je M16 x 2, potřebné rozměry bylo možné snadno dohledat ve strojnických tabulkách [34] – jedná se především o stoupání závitu s a o střední průměr d_2 .

$$\psi = \frac{s}{\pi d_2} = \frac{2 \text{ mm}}{\pi \cdot 14,701 \text{ mm}} = 0,0433 \text{ rad} \quad (12-82)$$

kde ψ je úhel stoupání v rad, s je stoupání závitu v mm a d_2 je střední průměr závitu v mm.

Dalším krokem k určení potřebného utahovacího momentu byl výpočet součinitele utahovacího momentu K [36] – viz rovnice (12-83). Vnější průměr závitu d je stejně jako jeho střední průměr d_2 možné snadno dohledat ve strojnických tabulkách [34]. Při výpočtu jsou důležité součinitele tření, jedná se konkrétně o součinitel tření v závitech f_s a o součinitel tření ve stykové ploše hlavy šroubu f_0 . Jejich hodnota byla zvolena na základě internetového zdroje [35].

$$K = \frac{d_2}{2d} \left(\frac{\operatorname{tg} \psi + \frac{f_s}{\cos \frac{\alpha}{2}}}{1 - \frac{f_s \operatorname{tg} \psi}{\cos \frac{\alpha}{2}}} \right) + 0,625 f_0 = \quad (12-83)$$

$$= \frac{14,701 \text{ mm}}{2.16 \text{ mm}} \left(\frac{\operatorname{tg}(0,043 \text{ rad}) + \frac{0,23}{\cos \frac{1,047 \text{ rad}}{2}}}{1 - \frac{0,23 \cdot \operatorname{tg}(0,0433 \text{ rad})}{\cos \frac{1,047 \text{ rad}}{2}}} \right) + 0,625 \cdot 0,2 = 0,252$$

kde K je součinitel utahovacího momentu, d_2 je střední průměr závitu v mm, d je velký průměr závitu v mm, ψ je úhel stoupání v rad, f_s je součinitel tření v závitech, α je úhel profilu závitu v rad a f_0 je součinitel tření ve stykové ploše hlavy šroubu.

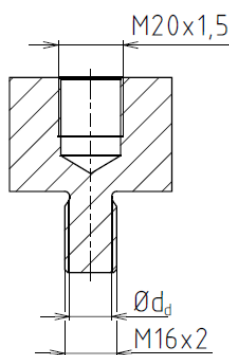
Podle rovnice (12-84) bylo možné jednoduše spočítat potřebnou velikost utahovacího momentu M_u v závislosti na požadované síle předpětí F_i , vnějším průměrem závitu d a na součiniteli utahovacího momentu K . Vypočítaná hodnota se zaokrouhlila kvůli možnosti nastavení na momentovém klíči.

$$M_u = K F_i d = 0,252 \cdot 3\,000 \text{ N} \cdot 0,016 \text{ m} = 12,1 \text{ Nm} \rightarrow 12 \text{ Nm} \quad (12-84)$$

kde M_u je utahovací moment v Nm, K je součinitel utahovacího momentu, F_i je síla předpětí šroubů v N a d je velký průměr závitu v mm.

12.5.3 Příloha 5.3 – Napětí v nebezpečném průřezu

Nyní bylo možné přistoupit na ověření napětí ve spojce. Nebezpečným průřezem je jednoznačně drážka vnějšího závitu (viz Obrázek 12-18), proto se v tomto místě ověřovala velikost napětí. Průměr dna drážky je $d_d = 13 \text{ mm}$ při volbě jejich normalizovaných rozměrů. Kontrola proběhla jak pro stav utahování, tak pro provozní zatížení.



Obrázek 12-18 Zobrazení rozměrů spojky

Ze známého utahovacího momentu M_u a ze známých rozměrů šroubů bylo možné jednoduše spočítat nominální napětí vzniklé vlivem utahovacího momentu τ_N (viz rovnice (12-85)). Stejně tak bylo možné podle rovnice (12-86) vypočítat nominální tahové napětí σ_N vzniklé vlivem axiální síly. Vlivem zaokrouhlení utahovacího momentu je v tomto výpočtu upravena síla předpětí podle vztahu v rovnici (12-84), tzn. $F_i = M_u / (Kd)$.

$$\tau_N = \frac{M_u}{W_k} = \frac{16M_u}{\pi d_d^3} = \frac{16 \cdot 12 \text{ Nm}}{\pi(0,013 \text{ m})^3} \cdot 10^{-6} = 27,8 \text{ MPa} \quad (12-85)$$

kde τ_N je nominální napětí v krutu v MPa, M_u je utahovací moment v Nm, W_k je modul průřezu v krutu v m^3 a d_d je průměr drážky závitu v m.

$$\sigma_N = \frac{F_i}{S_d} = \frac{4M_u}{Kd\pi d_d^2} = \frac{4 \cdot 12 \text{ Nm}}{0,252 \cdot 0,016 \text{ m} \cdot \pi(13 \text{ mm})^2} = 22,4 \text{ MPa} \quad (12-86)$$

kde σ_N je nominální napětí v tahu v MPa, F_i je síla předpětí šroubu v N, S_d je plocha průřezu drážky závitu v m^2 , M_u je utahovací moment v Nm, K je součinitel utahovacího momentu, d je velký průměr závitu v m a d_d je průměr drážky závitu v mm.

Oba výpočty počítají pouze nominální hodnotu napětí v tomto místě, proto bylo nutné uvažovat ještě součinitele vrubu β , kteří tato nominální napětí zvýší. K tomu bylo nejprve potřeba najít součinitel tvaru α_τ pro napětí v krutu a součinitel tvaru α_σ pro tahové napětí. Hodnoty obou součinitelů se určily na základě grafů v [36] na straně 1115. Pro výpočty součinitelů vrubu se využila Neuberova rovnice modifikovaná Heywoodem – viz rovnice (12-87) a (12-89).

$$\begin{aligned} \beta_\tau &= \frac{\alpha_\tau}{1 + \frac{2(\alpha_\tau - 1)}{\alpha_\tau} \cdot \frac{139 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1,5}}{Rm\sqrt{r}}} = \\ &= \frac{1,4}{1 + \frac{2(1,4 - 1)}{1,4} \cdot \frac{139 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1,5}}{620 \text{ MPa} \cdot \sqrt{1,5 \text{ mm}}}} = 1,27 \end{aligned} \quad (12-87)$$

kde β_τ je součinitel vrubu pro krut, α_τ je součinitel tvaru pro krut, Rm je mez pevnosti v MPa a r je poloměr na osazení v drážce v mm.

Výpočet skutečného napětí v drážce od krutu byl proveden v rovnici (12-88):

$$\tau = \beta_\tau \tau_N = 1,27 \cdot 27,8 \text{ MPa} = 35,2 \text{ MPa} \quad (12-88)$$

kde τ je napětí v krutu v MPa, β_τ je součinitel vrubu pro krut a τ_N je nominální napětí v krutu v MPa.

V rovnici (12-89) byl stejným způsobem přepočítán součinitel vrubu pro tah:

$$\beta_\sigma = \frac{\alpha_\sigma}{1 + \frac{2(\alpha_\sigma - 1)}{\alpha_\sigma} \cdot \frac{139 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1,5}}{Rm\sqrt{r}}} \quad (12-89)$$

$$= \frac{1,85}{1 + \frac{2(1,85 - 1)}{1,85} \cdot \frac{139 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1,5}}{620 \text{ MPa} \cdot \sqrt{1,5 \text{ mm}}}} = 1,58$$

kde β_σ je součinitel vrubu pro tah, α_σ je součinitel tvaru pro tah, R_m je mez pevnosti v MPa a r je poloměr na osazení v drážce v mm.

Výpočet skutečného napětí v drážce od krutu byl proveden v rovnici (12-90):

$$\sigma = \beta_\sigma \sigma_N = 1,58 \cdot 22,4 \text{ MPa} = 35,5 \text{ MPa} \quad (12-90)$$

kde σ je napětí v tahu v MPa, β_σ je součinitel vrubu pro tah a σ_N je nominální napětí v tahu v MPa.

Nakonec bylo možné podle skutečného napětí od krutu τ i od axiální síly σ vypočítat redukované napětí σ_{red} podle rovnice (12-91).

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(35,5 \text{ MPa})^2 + 3(35,2 \text{ MPa})^2} = 70,6 \text{ MPa} \quad (12-91)$$

Po kontrole spojky během utahování bylo nutné ještě provést kontrolu během provozu. Zde se při protlačování kapaliny směrem dolů projeví síla lineárního aktuátoru F_p , která může být až 15 kN. Tato síla se při protlačení směrem dolů sečte se silou předpětí a je to proto okamžik, ve kterém je spojka nejvíce zatěžována. Opět je nebezpečným místem drážka závitů o průměru d_d . Výpočet v rovnici (12-92) už rovnou počítá s vrubovým součinitelem β_σ určením v rovnici (12-89):

$$\sigma = \beta_\sigma \frac{4(F_i + F_p)}{\pi d_d^2} = 1,58 \frac{4(3\,000 + 15\,000) \text{ N}}{\pi(0,013 \text{ m})^2} \cdot 10^{-6} = 214,3 \text{ MPa} \quad (12-92)$$

kde σ je napětí v tahu v MPa, β_σ je součinitel vrubu pro tah, F_i je síla předpětí šroubů v N, F_p je síla lineárního aktuátoru v N a d_d je průměr drážky závitů v m.

Porovnáním výsledků z rovnic (12-91) a (12-92) je vidět, že drážka závitů je nejvíce namáhána během provozu. Vzhledem k této hodnotě napětí proto byla určena bezpečnost součásti k meznímu stavu únavy – viz rovnice (12-93).

$$k_{\text{cu}} = \frac{\sigma'_{\text{co}}}{\sigma} = \frac{241 \text{ MPa}}{214,3 \text{ MPa}} = 1,13 \quad (12-93)$$

kde k_{cu} je bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavy materiálu, σ je napětí v tahu v MPa a σ'_{co} je korigovaná mez únavy materiálu v MPa.

Podle rovnice (12-94) je možné jednoduše spočítat minimální potřebný počet nosných závitů pro největší zatížení. To je dáno součtem síly předpětí F_i a síly provozní F_p , tedy $F_i + F_p = 18$ kN. Střední průměr závitu d_2 a jeho nosnou hloubku H_1 je možné jednoduše určit na základě strojnických tabulek [34]. Materiál šestihranné tyče je E335GC+C s podobnými mechanickými vlastnostmi, jako mají šrouby pevnostní třídy 4.8. Na základě tohoto údaje se určil dovolený tlak v závitech $p_{dov} = 75$ MPa, který závisí na pevnostní třídě šroubu a materiálu matice. Je možné jej určit ze strojnických tabulek [34].

$$z = \frac{F_i + F_p}{\pi d_2 H_1 p_{dov}} = \frac{3\,000\text{ N} + 15\,000\text{ N}}{\pi(14,701\text{ mm})(0,9225\text{ mm})75\text{ MPa}} = 5,6 z \rightarrow 7 z \quad (12-94)$$

kde z je minimální potřebný počet závitů, F_s je největší síla, kterou je šroub namáhán v N, d_2 je střední průměr závitu v mm, H_1 je nosná hloubka závitu v mm a p_{dov} je dovolený tlak v MPa.

Připojovací závit má stoupání $s = 2$ mm, takže minimální potřebná hloubka zašroubování je $h = sz = 7 \cdot 2\text{ mm} = 14\text{ mm}$.

12.5.4 Příloha 5.4 – Kontrola závitu M20x1,5

Do spojky je z druhé strany zašroubovaný siloměr, který má daný rozměr závitu M20x1,5. U tohoto závitu se zkontroluje pouze vzniklý tlak v závitech spojky. Kontrola byla provedena podle rovnice (12-95), což je pouze upravená rovnice (12-94).

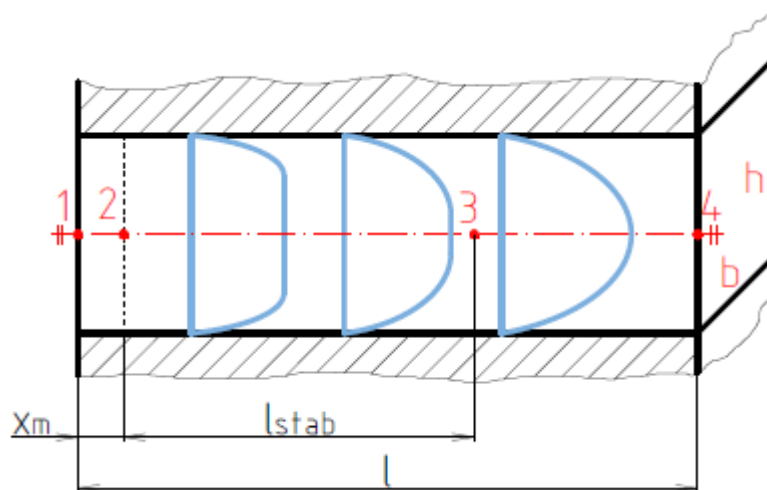
$$p_{dov} = \frac{F_i + F_p}{z\pi d_2 H_1} = \frac{3\,000\text{ N} + 15\,000\text{ N}}{9,9\pi(14,701 \cdot 0,9225)\text{ mm}} = 42,7\text{ MPa} < 75\text{ MPa} \quad (12-95)$$

kde z je minimální potřebný počet závitů, F_s je největší síla, kterou je šroub namáhán v N, d_2 je střední průměr závitu v mm, H_1 je nosná hloubka závitu v mm a p_{dov} je dovolený tlak v MPa.

Vzniklý tlak 45 MPa je velmi nízký a nepřekračuje povolenou hodnotu podle [36] v tabulce na straně 453, která je 75 MPa.

12.6 Příloha 6 – Výpočet tlakových ztrát ve štěrbině

Cílem následující kapitoly je teoreticky odvodit rovnice popisující velikost tlakového spádu, který vznikne v dané oblasti štěrbině v závislosti na jevech vyskytujících se v této oblasti. Výsledné rovnice odhalí, na čem jsou tyto ztráty nejvíce závislé a to pomůže naplánovat parametry kalibračního měření. Obrázek 12-19 schematicky zobrazuje jednotlivé uvažované části ve štěrbině. Ve štěrbině se předpokládá pouze laminární proudění, kterému odpovídá parabolický rychlostní profil.



Obrázek 12-19 Oblasti ve štěrbině

Oblasti ve štěrbině:

- 1-2: oblast těsně za vstupem kapaliny do štěrbině, vyskytuje se zde tzv. vena contracta
- 2-3: oblast, ve které se vyvíjí rychlostní profil
- 3-4: oblast s vyvinutým rychlostním profilem

Pro lepší názornost je nejprve odvozena rovnice pro oblast s vyvinutým rychlostním profilem (3-4). Tento postup je výrazně jednodušší, oproti oblasti, ve které se rychlostní profil teprve vyvíjí (2-3). Pro oblast 2-3 jsou stěžejní části postupu analogické.

12.6.1 Příloha 6.1 – Oblast vyvinutého rychlostního profilu (mezi body 3 a 4)

Toto odvození je platné pouze pro kapaliny, které nemají mez toku. Pro odvození rovnice popisující tlakový spád v této oblasti se vycházelo z rovnováhy sil, kterou popisuje rovnice (12-96). Na pravé straně rovnice se uvažuje pouze smykové napětí na širších stěnách štěrbině.

$$\Delta p_{34} b h = 2 \tau_w b l_{34} \quad (12-96)$$

kde Δp je tlakový spád v Pa, b , h je šířka a tloušťka štěrbině slit-flow reometru v m, τ_w je smykové napětí na stěně štěrbině v Pa a l_{34} je délka úseku 3-4 v m.

Je patrné, že pro výpočet jsou známy všechny parametry, kromě smykového napětí na stěně τ_w . Pro určení smykového napětí na stěně se vycházelo z Newtonova zákona viskozity – viz rovnice (12-97).

$$\tau_w = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{\delta v_x}{\delta h_y} \quad (12-97)$$

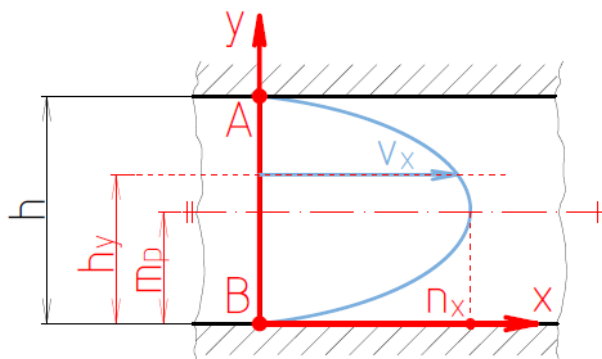
kde τ_w je smykové napětí na stěně štěrbině v Pa, η je dynamická viskozita kapaliny v Pa.s, γ je smykový spád v s^{-1} , v_x je rychlost v daném místě rychlostního profilu v m/s a h_y je příčná poloha ve štěrbině v m.

Nejprve je potřeba určit rovnici popisující parabolický rychlostní profil, pomocí derivace získat smykový spád na stěně a ze smykového spádu získat smykové napětí na stěně. Rovnice (12-98) popisuje tvar parabolického rychlostního profilu a je založena na obecném popisu paraboly, kde se jako neznámé použily přímo symboly odpovídající proudění ve štěrbině.

$$v_x = n_x - \frac{(h_y - m_p)^2}{2p} \quad (12-98)$$

kde v_x je rychlost v daném místě rychlostního profilu v m/s, n_x je maximální rychlost ve vyvinutém rychlostním profilu v m/s, h_y je příčná poloha ve štěrbině v m, m_p je parametr udávající osu symetrie paraboly a p je parametr udávající šířku paraboly v m.

Obrázek 12-20 zobrazuje vytvořený parabolický rychlostní profil ve štěrbině s naznačenými parametry z rovnice (12-98). Na základě tohoto obrázku byl zvolen parametr $m_p = h/2$.



Obrázek 12-20 Vyvinutý rychlostní profil ve štěrbině

Musí platit, že $v_x = 0$ m/s pro $h_y = 0$ m a také pro $h_y = h$ (předpoklad nulového skluzu na stěně štěrbině). Po dosazení jedné z těchto hodnot h_y do rovnice (12-98) a po následných úpravách se získá rovnice (12-99). Ke stejném výsledku se dojde i při použití druhé hodnoty h_y .

$$p = \frac{h^2}{8n_x} \quad (12-99)$$

kde p je parametr udávající šířku paraboly v m, h je tloušťka štěrbině slit-flow reometru v m a n_x je maximální rychlost ve vyvinutém rychlostním profilu v m/s.

Je možné dohledat [24], že poměr střední rychlosti $v_{s\bar{s}}$ ve štěrbině a maximální rychlosti ve štěrbině $v_{\max\bar{s}}$ je pro laminární proudění roven: $v_{\max\bar{s}} = 1,5v_{s\bar{s}}$. Jelikož parametr n_x v rovnici (12-98) udává největší rychlost, je možné ho v rovnici nahradit. Po dosazení a úpravách rovnice (12-98) je tedy možné získat rovnici popisující tvar rychlostního profilu v obdélníkové štěrbině – viz rovnice (12-100).

$$v_x = \frac{3}{2} v_{s\bar{s}} \left[1 - \frac{4(h_y - 0,5h)^2}{h^2} \right] \quad (12-100)$$

kde v_x je rychlost v daném místě rychlostního profilu v m/s, $v_{s\bar{s}}$ je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s, h_y je příčná poloha ve štěrbině v m a h je tloušťka štěrbinu slit-flow reometru v m.

Smykový spád je dán derivací rychlostního profilu podle směru kolmého na směr tečení. Pro určení velikosti smykového spádu v kterékoliv oblasti je výpočet proveden v rovnici (12-101).

$$\dot{\gamma} = \frac{\delta v_x}{\delta h_y} = \frac{-12v_{s\bar{s}}(h_y - 0,5h)}{h^2} \quad (12-101)$$

kde $\dot{\gamma}$ je smykový spád v s^{-1} , v_x je rychlost v daném místě rychlostního profilu v m/s, h_y je příčná poloha ve štěrbině v m, $v_{s\bar{s}}$ je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s a h je tloušťka štěrbinu slit-flow reometru v m.

Při určování napětí na stěně je parametr $h_y = 0$, resp. $h_y = h$. Pro oba případy se po dosazení do rovnice (12-101) získá rovnice (12-102) udávající velikost smykového spádu na stěně.

$$\dot{\gamma} = \frac{6v_{s\bar{s}}}{h} \quad (12-102)$$

kde $\dot{\gamma}$ je smykový spád v s^{-1} , $v_{s\bar{s}}$ je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s a h je tloušťka štěrbinu slit-flow reometru v m.

Smykové napětí na stěně je nyní možné jednoduše vyjádřit podle Newtonova vztahu viskozity – viz rovnice (12-103).

$$\tau_w = \eta \dot{\gamma} = \frac{6\eta v_{s\bar{s}}}{h} \quad (12-103)$$

kde τ_w je smykové napětí na stěně štěrbinu v Pa, η je dynamická viskozita kapaliny v Pa.s, $\dot{\gamma}$ je smykový spád v s^{-1} , $v_{s\bar{s}}$ je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s a h je tloušťka štěrbinu slit-flow reometru v m.

Dosazením rovnice (12-103) do rovnice (12-96) a po následných úpravách je možné získat výsledný vztah pro teoretickou tlakovou ztrátu v oblasti s vyvinutým rychlostním profilem – viz rovnice (12-104).

$$\Delta p_{34}bh = 2\tau_w bl_{34} \rightarrow \Delta p_{34} = \frac{12\eta v_s l_{34}}{h^2} \quad (12-104)$$

kde Δp je tlakový spád v Pa, b , h je šířka a tloušťka štěrbiny slit-flow reometru v m, τ_w je smykové napětí na stěně štěrbin v Pa, l_{34} je délka úseku 3-4, η je dynamická viskozita kapaliny v Pa.s a v_s je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s.

Určený vzorec se shoduje se vzorcem, který je možné najít v literatuře [24]. Problém byl, že nebylo možné najít podobný vztah pro oblast, ve které se rychlostní profil teprve vyvíjí. Proto se v oblasti s vyvinutým rychlostním profilem určila správnost postupu, který se následně aplikoval na oblast tvorby rychlostního profilu.

Je vidět, že pro štěrbinu o tloušťce h a délce úseku l_{34} nezávisle na její šířce b je tlaková ztráta od vyvinutého rychlostního profilu přímo úměrná pouze dynamické viskozitě η a střední rychlosti ve štěrbině v_s .

12.6.2 Příloha 6.2 – Oblast tvorby rychlostního profilu (mezi body 2 a 3)

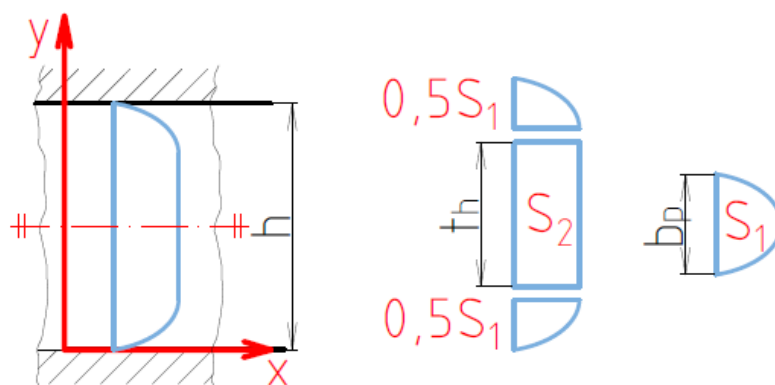
Hlavní myšlenka výpočtu pro tuto oblast je stejná, jako pro oblast s vytvořeným rychlostním profilem. Cílem je získat vztah popisující tlakový spád v oblasti tvorby rychlostního profilu. Opět se vycházelo z rovnováhy sil – viz rovnice (12-105). Musel se ale zohlednit fakt, že tlak neklesá rovnoměrně, tzn. ani smykové napětí a smykový spád na stěně nejsou konstantní.

$$\Delta p_{23}bh = 2b\tau_w dx \quad (12-105)$$

kde Δp je tlakový spád v Pa, b , h je šířka a tloušťka štěrbiny slit-flow reometru v m, τ_w je smykové napětí na stěně štěrbin v Pa a dx je infinitezimální posun ve směru proudění kapaliny v m.

Postup je stejný, jako u oblasti s vytvořeným rychlostním profilem. K vyjádření velikosti smykového napětí na stěně je potřeba nejdříve určit velikost smykového spádu na stěně a k tomu je potřeba popsat tvar rychlostního profilu.

Ihned po vstupu do štěrbin je rychlostní profil pístový a postupně se vyvíjí do tvaru paraboly – viz Obrázek 12-22 nebo Obrázek 12-19. Postupně se vyvíjející rychlostní profil je tak možné rozdělit na více pomyslných částí – viz Obrázek 12-21. Je přitom možné problém řešit jako 2D úlohu.



Obrázek 12-21 Rozdělení rychlostního profilu

V blízkosti stěn štěrbin jsou parabolické profily a ve středu štěrbin je pístový profil. Celá problematika je symetrická, proto je možné ze dvou polovin paraboly složit úplnou parabolu – viz Obrázek 12-21. Výpočet je založen na konstantním průtoku ve všech okamžicích tvorby rychlostního profilu. To znamená, že součet ploch od parabolického rychlostního profilu S_1 s plochou pístového profilu S_2 se musí rovnat střední rychlosti proudění ve štěrbině v_s vynásobené tloušťkou štěrbin h – viz rovnice (12-106).

$$v_s h = S_1 + S_2 \quad (12-106)$$

kde v_s je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s, h je tloušťka štěrbin slit-flow reometru v m, S_1 je plocha parabolického rychlostního profilu v m^2 a S_2 je plocha pístového rychlostního profilu v m^2 .

Pro určení plochy parabolické části rychlostního profilu se opět vychází z obecného popisu paraboly, kde se jako neznámé použily přímo symboly odpovídající proudění ve štěrbině – viz rovnice (12-107).

$$v_x = n_x - \frac{(h_y - m_p)^2}{2p} \quad (12-107)$$

kde v_x je rychlost v daném místě rychlostního profilu v m/s, n_x je maximální rychlost ve vyvinutém rychlostním profilu v m/s, h_y je příčná poloha ve štěrbině v m, m_p je parametr udávající osu symetrie paraboly v m a p je parametr udávající šířku paraboly v m.

Integrací rovnice rychlostního profilu a po následných úpravách se získal vztah pro výpočet plochy paraboly – viz rovnice (12-108).

$$S_1 = \int_0^{b_p} v_x dy = \dots = b_p n_x - \frac{(b_p - m_p)^3 + m_p^3}{6p} \quad (12-108)$$

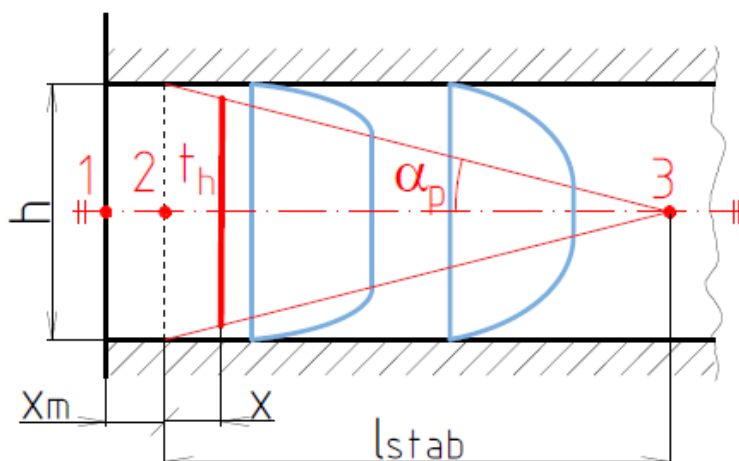
kde S_1 je plocha parabolického rychlostního profilu v m^2 , v_x je rychlost v daném místě rychlostního profilu v m/s, b_p je výška paraboly při tvorbě rychlostního profilu v m, n_x je maximální rychlost ve vyvinutém rychlostním profilu v m/s, m_p je parametr udávající osu symetrie paraboly v m a p je parametr udávající šířku paraboly v m.

Aby bylo možné matematicky popsat proces tvorby rychlostního profilu, je nutné zavést další proměnné. První proměnná je zavedena do výpočtu parametru n_x , který udává největší rychlost na parabolickém rychlostním profilu. Jelikož se ale tato rychlost postupně mění, byla proto zavedena proměnná z_p . Tato proměnná může nabývat hodnot od 1 do 1,5. Pro $z_p = 1$ situace odpovídá pístovému profilu v celé tloušťce štěrbině (tzn. rychlostní profil v okamžiku, než se začne vyvíjet). Pro $z_p = 1,5$ situace odpovídá plně vyvinutému rychlostnímu profilu.

$$n_x = z_p v_{\xi} \quad (12-109)$$

kde n_x je maximální rychlost ve vyvinutém rychlostním profilu v m/s, z_p je zvolený parametr paraboly a v_{ξ} je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s.

Při výpočtu bylo uvažováno, že se rychlostní profil vyvíjí rovnoměrně – viz Obrázek 12-22. Na tomto obrázku je znázorněno, že rychlostní profil se začne vyvíjet až za oblastí turbulencí – tzv. vena contracta.



Obrázek 12-22 Vývoj rychlostního profilu

Musí platit, že součet výšky parabolického profilu b_p s výškou pístového profilu t_h se rovná tloušťce štěrbině h – viz rovnice (12-110).

$$h = t_h + b_p \quad (12-110)$$

kde h je tloušťka štěrbině slit-flow reometru v m, t_h je výška pístového profilu ve štěrbině v m a b_p je výška paraboly při tvorbě rychlostního profilu v m.

Úhel α_p je dán tloušťkou štěrbině h a stabilizační délkou. Určení stabilizační délky je možné pouze teoreticky a různé přístupy se hodně liší, proto tato hodnota je pouze orientační. Výpočet tohoto úhlu je proveden v rovnici (12-111).

$$\operatorname{tg} \alpha_p = \frac{h}{2l_{\text{stab}}} \quad (12-111)$$

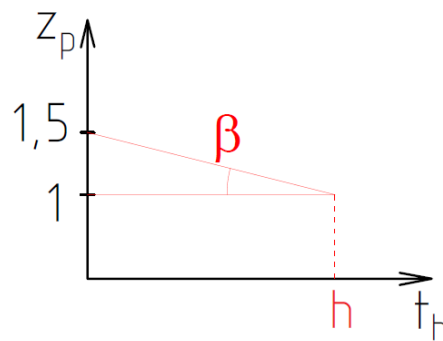
kde α_p je úhel tvorby rychlostního profilu ve $^\circ$, h je tloušťka štěrbině slit-flow reometru v m a l_{stab} je stabilizační délka pro vytvoření rychlostního profilu v m.

Na základě známých rovnic je možné jednoduše vyjádřit výšku pístového profilu t_h , který se v daném místě štěrbině nachází – viz rovnice (12-112).

$$t_h = \frac{h}{l_{stab}}(l_{stab} - x) \quad (12-112)$$

kde t_h je výška pístového profilu ve štěrbině v m, h je tloušťka štěrbině slit-flow reometru v m, l_{stab} je stabilizační délka pro vytvoření rychlostního profilu v m a x je zvolené místo v průběhu tvorby rychlostního profilu v m.

Jelikož se rychlostní profil vyvíjí rovnoměrně, závisí zvolený parametr paraboly z_p na výšce pístového profilu. Jeho závislost graficky znázorňuje Obrázek 12-23 a matematicky popisuje rovnice (12-113).



Obrázek 12-23 Zvolený parametr paraboly jako funkce výšky pístového profilu

$$z_p = 1,5 - \frac{1}{2h} t_h \quad (12-113)$$

kde z_p je zvolený parametr paraboly, h je tloušťka štěrbině slit-flow reometru v m a t_h je výška pístového profilu ve štěrbině v m.

Do rovnice (12-106) se za obsah parabolické části profilu S_1 dosadily rovnice (12-108), (12-109), (12-110), (12-112) a (12-113). Na základě rovnosti obsahů byl po úpravách vyjádřen parametr p udávající šířku paraboly – viz rovnice (12-114).

$$p = \frac{b_p^3}{24(b_p n_x + t_h n_x - v_s h)} \quad (12-114)$$

kde p je parametr udávající šířku paraboly v m, b_p je výška paraboly při tvorbě rychlostního profilu v m, n_x je maximální rychlost ve vyvinutém rychlostním profilu v m/s, t_h je výška pístového profilu ve štěrbině v m, v_s je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s a h je tloušťka štěrbině slit-flow reometru v m.

Smykový spád je dán derivací rychlostního profilu. Stejně jako pro výpočet vyvinutého rychlostního profilu, i v tomto případě se smykový spád počítal na stěně štěrbině, tzn. pro $y = 0$.

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{1}{2p} 2(y - m_p) \rightarrow \dot{\gamma} = \frac{m_p}{p} \quad (12-115)$$

kde $\dot{\gamma}$ je smykový spád v s^{-1} , v_x je rychlost v daném místě rychlostního profilu v m/s, p je parametr udávající šířku paraboly v m, y je poloha kolmá na směr proudění ve štěrbině v m, m_p je parametr udávající osu symetrie paraboly v m a p je parametr udávající šířku paraboly v m.

Smykové napětí na stěně štěrbin τ_w je možné opět vyjádřit pomocí Newtonova vztahu viskozity – viz rovnice (12-116).

$$\tau_w = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{m_p}{p} \quad (12-116)$$

kde τ_w je smykové napětí na stěně štěrbin v Pa, η je dynamická viskozita kapaliny v Pa.s, $\dot{\gamma}$ je smykový spád v s^{-1} , m_p je parametr udávající osu symetrie paraboly v m a p je parametr udávající šířku paraboly v m.

Teoretický tlakový spád vzniklý pouze od oblasti, ve které se vyvíjí rychlostní profil, je možné vyjádřit z rovnice rovnováhy sil – viz rovnice (12-117).

$$\Delta p_{23} b h = 2 \tau_w b dx \rightarrow \Delta p_{23} = \frac{2}{h} \int_{x_{tp}}^{x_{vp}} \tau_w dx \quad (12-117)$$

kde Δp je tlakový spád v Pa, b , h je šířka a tloušťka štěrbin slit-flow reometru v m a τ_w je smykové napětí na stěně štěrbin v Pa a dx je infinitezimální posun ve směru proudění kapaliny v m.

Po rozepsání rovnice (12-117) a po následných úpravách bylo možné získat finální vztah pro určení tlakového spádu od oblasti, kde se vyvíjí rychlostní profil – viz rovnice (12-118). Parametr m_p udávající osu symetrie byl určen jako $m_p = b_p/2$.

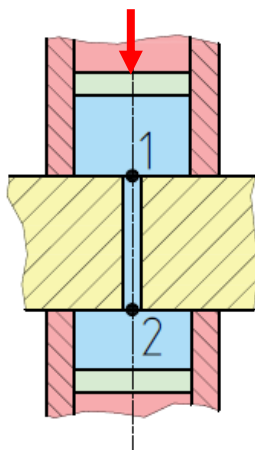
$$\Delta p_{23} = \frac{0,6 v_s^2 D_h^2 \rho}{h^2} [\ln(x_m + l_{stab}) - \ln x_m] \quad (12-118)$$

kde Δp je tlakový spád v Pa, h je tloušťka štěrbin slit-flow reometru v m, v_s je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s, D_h je hydraulický průměr štěrbin v m, ρ je hustota kapaliny v kg/m^3 , x_m je vzdálenost od kraje štěrbin, ve které je vena-contracta v m a l_{stab} je stabilizační délka pro vytvoření rychlostního profilu v m.

Na základě výsledné rovnice (12-118) je vidět, že tyto tlakové ztráty v této oblasti závisí především na rychlosti proudění pro štěrbinu o konstantní tloušťce h . Samozřejmě má vliv i viskozita kapaliny, která ovlivňuje stabilizační délku l_{stab} a také velikost oblasti vena contracta x_m .

12.6.3 Příloha 6.3 – Rovnice pro vyhodnocení kalibračních měření

Pro určení závislosti ztrát na Reynoldsově čísle se vycházelo z Bernoulliho rovnice – viz rovnice (12-119). Body pro výpočet se zvolily v obou válcích (viz Obrázek 12-24), takže v Bernoulliho rovnici se vyrušila složka kinetické měrné energie. Vzhledem k velkým tlakům se zanedbala i složka od potenciální měrné tíhové energie. Výsledný vztah dává do rovnosti naměřený tlakový spád $\Delta p_{\text{nam}} = p_1 - p_2$ se ztrátami.



Obrázek 12-24 Schéma protlačení kapaliny štěrbinou pro Bernoulliho rovnici

$$p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho Y_z + \rho g h_2 \rightarrow \Delta p_{\text{nam}} = \rho Y_z \quad (12-119)$$

kde p_1, p_2 jsou tlaky ve zvolených bodech Bernoulliho rovnice v Pa, ρ je hustota kapaliny v kg/m^3 , v_1, v_2 je rychlost ve zvolených bodech Bernoulliho rovnice v m/s, g je gravitační zrychlení v m/s^2 , h_1, h_2 je výška ve zvolených bodech Bernoulliho rovnice v m a Y_z je ztrátová měrná energie v J/kg.

Na základě rešerše je možné rozepsat ztrátovou měrnou energii Y_z dvěma způsoby – viz rovnice (12-120). Dále se v téhle kapitole pracovalo s levou částí této rovnice, která vychází z Darcy-Weisbachova vztahu.

$$Y_z = (\xi_m + \xi_1) \cdot \frac{v_s^2}{2} = K_z Q^2 \quad (12-120)$$

kde Y_z je ztrátová měrná energie v J/kg, $\xi_{m,1}$ je ztrátový součinitel místních a délkových ztrát, v_s je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s, K_z je výsledná ztrátová konstanta daného systému v m^{-4} a Q je celkový průtok v daném systému v m^3/s .

V rovnici (12-120) je možné na základě rešerše jednoduše rozepsat ztrátový součinitel délkových ztrát ξ_1 . – viz rovnice (12-121). Třecí součinitel kapaliny o stěnu potrubí λ je pro proudění ve štěrbině s obdélníkovým průřezem možné vyjádřit jako $\lambda = 96/Re$.

$$\xi_l = \lambda \frac{l}{d_h} = \frac{96}{Re} \frac{l}{d_h} \quad (12-121)$$

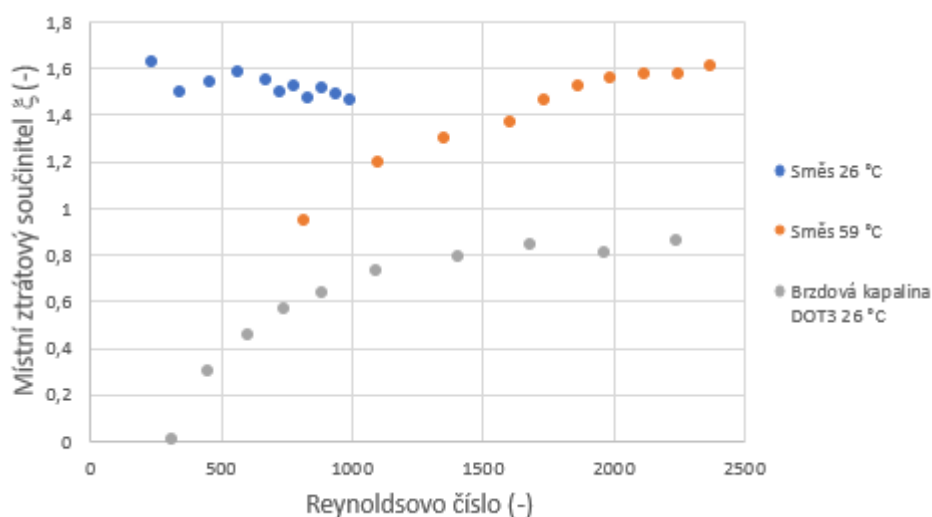
kde ξ_l je ztrátový součinitel délkových ztrát, λ je třecí součinitel kapaliny o stěnu potrubí, l je délka štěrbin v m, d_h je hydraulický průměr štěrbin v m a Re je Reynoldsovo číslo.

Podle rovnice (12-120) bylo možné z Bernoulliho rovnice vyjádřit součinitel místních ztrát ξ_m . Při vyjádření ztrátového součinitele místních ztrát z Bernoulliho rovnice se počítá s celým naměřeným tlakovým spádem – viz rovnice (12-122). Od tohoto tlakového spádu se ale odečítá vliv třecích ztrát kapaliny o stěnu potrubí.

$$\xi_m = \frac{2\Delta p_{nam}}{\rho v_s^2} - \frac{96l}{Re d_h} \quad (12-122)$$

kde ξ_m je ztrátový součinitel místních ztrát, Δp_{nam} je naměřená hodnota tlakového spádu v Pa, ρ je hustota kapaliny v kg/m^3 , v_s je střední rychlost kapaliny ve štěrbině v m/s, l je délka štěrbin v m, Re je Reynoldsovo číslo a d_h je hydraulický průměr štěrbin v m.

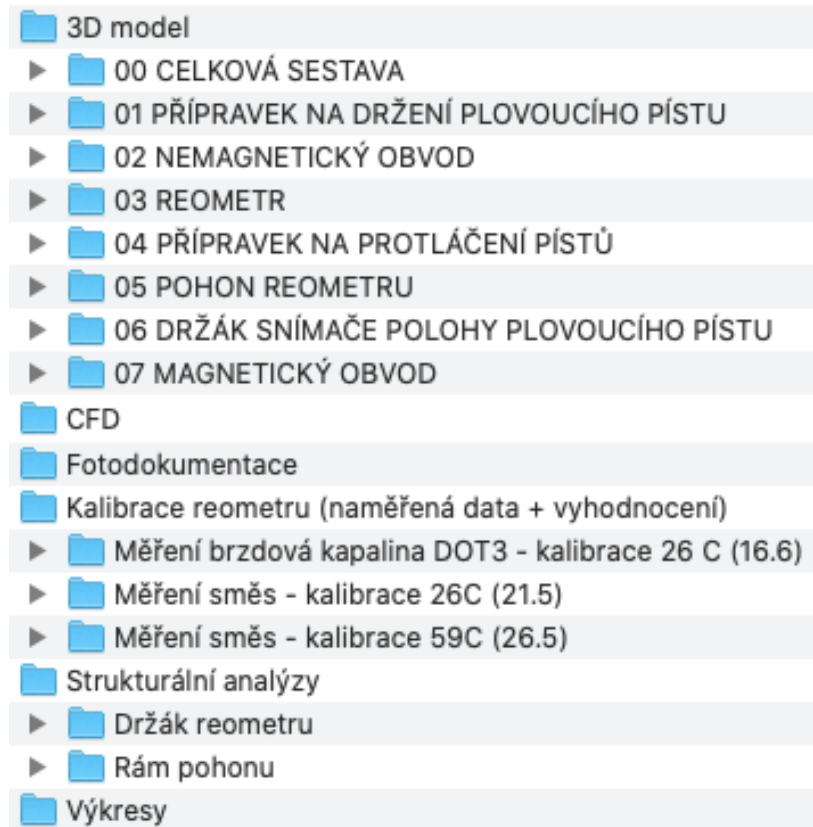
Při vykreslování závislosti ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle se neuvažovaly body z měření při velmi nízkých Reynoldsových číslech, protože byly zatíženy nepřesností snímačů. Průběh měřených bodů ukazuje rozdílné hodnoty ztrátového součinitele pro jednotlivé kapaliny. Zajímavé jsou body z měření směsi olejů pro 26 °C, protože se zcela liší od zbylých dvou kapalin. Jejich závislost není rostoucí, ale je klesající. Podobný rozdíl v průběhu ztrátového součinitele získal i Ing. Michal Kubík, Ph.D. v CFD simulacích, kdy se ze zatím nejasných příčin obrátil průběh křivek.



Obrázek 12-25 Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle

12.7 Externí přílohy

1. Příloha E1 – materiálový list nerezové oceli 1.4307 (1.4301)
2. Příloha E2 – vyhodnocení kalibračních měření
3. CD s následující strukturou složek (odevdáno i elektronicky na úložiště):



Obrázek 12-26 Struktura složek externích příloh