



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# KONSTRUKCE MODULU SIMULÁTORU PRO ANALÝZU TŘENÍ A OPOTŘEBENÍ ZUBŮ PŘI ČIŠTĚNÍ

DESIGN OF A SIMULATOR MODULE FOR ANALYSIS OF FRICTION AND WEAR OF TEETH DURING  
CLEANING

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Snopek

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.

BRNO 2021





# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Lukáš Snopek</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

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

## **Konstrukce modulu simulátoru pro analýzu tření a opotřebení zubů při čištění**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Současný výzkum ve stomatologii se zaměřuje na analýzy tribologických procesů, které způsobují úbytek tvrdých zubních tkání a také výplňových materiálů v důsledku čištění zubů pomocí zubního kartáčku. Často je diskutován vliv tvaru zakončení a tvrdosti vláken kartáčku a také složení zubní pasty. Aby bylo možné objektivně posoudit míru tření a opotřebení zubů při čištění, tak je zapotřebí zkonstruovat modul, který bude součástí komerčního tribometru Bruker UMT TriboLab. Modul musí zajistit fixaci zubního kartáčku a zubu, popř. vzorku zubní výplně při jejich vzájemném pohybu a definovaném zatížení, mazivu a teplotě.

Typ práce: vývojová – konstrukční

### **Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem je konstrukce modulu pro tribometr Bruker UMT TriboLab, který zajistí měření součinitele tření a opotřebení mezi zubním kartáčkem a zubem, popř. modelovým materiálem zubu nebo zubní výplně, za podmínek mazání kontaktu roztokem zubní pasty s umělými slinami.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- provést kritickou rešerši současných simulátorů, pracujících na principu kartáček–zub (modelový materiál zubu/výplně),
- na základě aktuálních vědeckých studií navrhnout podmínky experimentů pro měření součinitele tření a opotřebení pro konfiguraci kartáček–zub (modelový materiál zubu/výplně),
- provést konstrukci držáku kartáčku a držáku zubu (modelového materiálu zubu/výplně), které budou součástí tribometru Bruker UMT TriboLab a umožní mazání kontaktní dvojice roztokem zubní pasty s umělými slinami včetně ohřevu,
- vytvořit výkresovou dokumentaci pro výrobu (výkres sestavy a výkresy součástí),
- zajistit montáž modulu a realizaci experimentu, který ověří funkčnost navrženého modulu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení.

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

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

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukonceni/>

### **Seznam doporučené literatury:**

LANZA, Antonio, Alessandro RUGGIERO and Ludovico SBORDONE. Tribology and Dentistry: A Commentary. *Lubricants*. 2019, 7(6). ISSN 2075-4442. doi:10.3390/lubricants7060052.

BIZHANG, Mozghan, Ilka SCHMIDT, Yong-Hee Patricia CHUN, Wolfgang H. ARNOLD, Stefan ZIMMER and Luigi F. RODELLA. Toothbrush abrasivity in a long-term simulation on human dentin depends on brushing mode and bristle arrangement. *PLOS ONE*. 2017, 12(2). ISSN 1932-6203. doi:10.1371/journal.pone.0172060.

SCHERGE, Matthias, Sandra SAREMBE, Andreas KIESOW and Matthias PETZOLD. Dental tribology at the microscale. *Wear*. 2013, 297(1-2), 1040-1044. ISSN 00431648. doi:10.1016/j.wear.2012.11.066.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem modulu pro tribologický simulátor Bruker UMT TriboLab, který bude využit při výzkumu v oblasti analýz opotřebení tvrdých zubních tkání a výplňových materiálů v důsledku čištění zubů. Cílem této práce byl návrh podmínek experimentu, konstrukce modulu, tvorba výkresové dokumentace, výroba a následná realizace validačního experimentu. Podmínky experimentu byly stanoveny na základě rešerše a k vytvoření optimálního konstrukčního řešení byly průběžně vyráběny prototypy pomocí metody 3D tisku. Nakonec byly na základě výkresové dokumentace vyrobeny dva upínače zubního kartáčku a dva upínače vzorku zubní výplně. Následnou montáží upínačů a realizací experimentu na tribometru byla ověřena jejich funkčnost, čímž je možné prohlásit všechny cíle za úspěšně splněné. Nyní tyto upínače budou součástí několika výzkumných úkolů v oblasti orální biotribologie.

## KLÍČOVÁ SLOVA

simulátor, upínač, zubní kartáček, zub, součinitel tření, opotřebení

## ABSTRACT

This thesis focuses on the design of a module for the tribological simulator Bruker UMT TriboLab, which will be used in research in the field of analysis of wear of hard dental tissues and filling materials due to tooth cleaning. The aim of this work was the design of experimental conditions, module construction, creation of drawing documentation, production and subsequent implementation of a validation experiment. The conditions of the experiment were determined on the basis of research and to create an optimal design solution, prototypes were continuously produced using the 3D printing method. Finally, two toothbrush fixtures and two dental filling sample fixtures were made based on the drawing documentation. Subsequent assembly of the fixtures and the implementation of the experiment on the tribometer verified their functionality, which makes it possible to declare all the goals successfully met. Now these fixtures will be part of several research tasks in the field of oral biotribology.

## KEYWORDS

simulator, fixture, toothbrush, tooth, coefficient of friction, wear



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SNOPEK, Lukáš. *Konstrukce modulu simulátoru pro analýzu tření a opotřebení zubů při čištění*. Brno, 2021, 70 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131886>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.



## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Martinu Vrbkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a čas trávený na konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Čípkovi za pomoc s realizací validačního experimentu a své rodině za podporu při studiu.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Martina Vrbky, 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

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Interakce mezi kartáčkem a zubem	14
2.1.1	Zubní kartáček	15
2.1.2	Zuby	17
2.2	Přehled dostupných simulátorů opotřebení zubů	18
2.2.1	Tribometr Bruker UMT Tribolab	18
2.2.2	Simulátor Univerzity v Southamptonu	20
2.2.3	Simulátor - Fraunhofer IWM	21
2.2.4	Simulátor – ZM 3.8	22
2.2.5	Simulátor – Princip zub-zub	24
2.2.6	Simulátor pro analýzu iterace zubní pasty a zubu	26
2.2.7	Simulátor Mach-1	27
2.2.8	Výroba zubních kartáčků	29
2.3	Podmínky experimentu	30
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>31</b>
3.1	Analýza problému	31
3.2	Cíle práce	31
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>32</b>
4.1	Koncepty upínače kartáčku (UK)	32
4.1.1	UK I	32
4.1.2	UK II	33
4.1.3	UK III	34
4.1.4	UK IV	35
4.1.5	UK V	37
4.2	Koncepty upínače vzorku (UV)	38
4.2.1	UV I	38
4.2.2	UV II	39
4.2.3	UV III	40
4.2.4	UV IV	41
4.3	Koncepty vany	42
4.3.1	Vana I	42
4.3.2	Vana II	43

4.3.3	Vana III	44
4.3.4	Zhodnocení konceptů van	45
<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>46</b>
5.1	Upínač kartáčku	46
5.1.1	Tělo upínače	47
5.1.2	Přidržovač	48
5.1.3	Materiál a drsnost povrchů	49
5.2	Vana	49
5.2.1	Vana vnější	50
5.2.2	Vana vnitřní	51
5.2.3	Spojení van	53
5.2.4	Materiál a drsnost povrchů	54
5.3	Prototypy a jejich otestování	54
5.4	Výroba	56
5.5	Příslušenství	57
5.6	Experiment	58
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>62</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>65</b>
9.1	Seznam veličin	65
9.2	Seznam zkratk	65
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>66</b>
10.1	Seznam obrázků	66
10.2	Seznam grafů	68
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>69</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>70</b>

# 1 ÚVOD

Jedním z hlavních podnětů pro zvolení tématu závěrečné práce byla možnost aktivně se podílet na výzkumu a hledání řešení problému v současné stomatologii. Konkrétně se jedná o problematiku úbytku tvrdých zubních tkání a výplňových materiálů v důsledku čištění zubů. Na Masarykově univerzitě byl zahájen výzkum s cílem sestavit simulátor, který by tuto problematiku věrohodnými výsledky osvětlil a poukázal na další možná řešení.

Hlavním cílem bylo navržení a následná realizace upínačů (držáků) zubních kartáčků a vzorků zubních výplní pro měření tření a opotřebení na tribologickém simulátoru Bruker. Za cíl jsem si dal vytvořit funkční a praktické upínače vhodné pro širokou škálu zkoumaných vzorků. Výstupy z takového výzkumu by mohly přinést cenné informace pro současnou stomatologii. Díky tomuto výzkumu je možné vědecky zkoumat např. zda abrazivní částice zubních past mají vliv na opotřebení zubů nebo dále zda tvrdost štětin jednotlivých zubních kartáčků má nějaký zásadnější vliv na jejich poškození. Záměrem bylo pokusit se, jak o koncepční, tak i konstrukční řešení problému, ale také o tvorbu prototypů a finální výrobu upínačů, což je hlavním cílem této práce.

V současné době je jedním z hlavních problematických prvků celého procesu zkoumání nepraktické nebo popř. složité konstrukční řešení stávajících simulátorů. Na tyto faktory byl kladen během realizace projektu velký důraz. Tato práce si klade za cíl zlepšit realizaci tribologických experimentů.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Interakce mezi kartáčkem a zubem

Vzájemným působením kartáčku na zub dochází k odstraňování nečistot a zubního plaku z povrchu zubu. Zároveň je při tomto ději povrch zubu, případně vyplňující materiál nahrazující zubní sklovinu a dentin, mechanicky zatěžován zubním kartáčkem a to má za následek vznik povrchových defektů tvrdých zubních tkání, ale i výplní [1]. Z hlediska tribologie se zde jedná o opotřebení, způsobené třením štětin kartáčku o povrch zubu (zubní výplně). Třecí síla, která vzniká v místě kontaktu, je přímo úměrná normálové síle a koeficientem úměrnosti je součinitel tření [2].

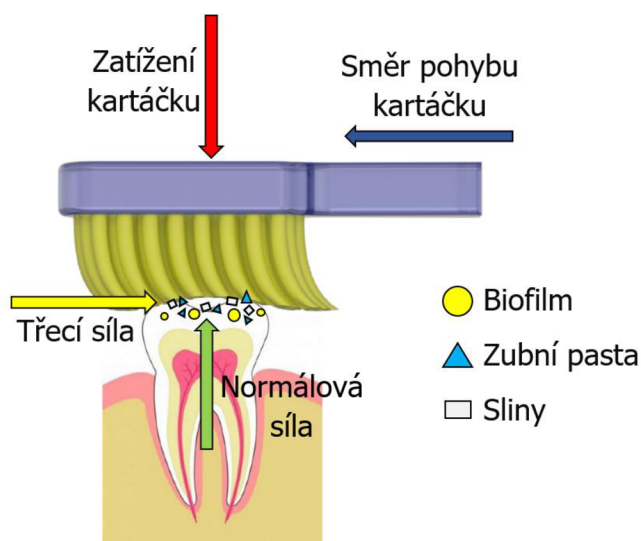
Na velikost součinitele tření mají vliv především materiály vzájemně působících těles a jakost jejich povrchů. Hodnotu součinitele tření ovlivňuje také přítomnost zubní pasty, slin a biofilmu (zubního plaku). Na obrázku 2-1 je schematicky znázorněný proces čištění zubu, zatížení kartáčku, pohyb kartáčku a reakční síly v místě kontaktu. Součinitel tření, který je potřeba zjistit, je možné odvodit z následujících rovnic:

$$F_N = F_Z \quad (2.1)$$

$$f_T = \frac{F_T}{F_N} \quad (2.2)$$

kde:

$F_N$	[N]	normálová síla
$F_Z$	[N]	zatěžující síla
$F_T$	[N]	třecí síla
$f_T$	[-]	součinitel tření

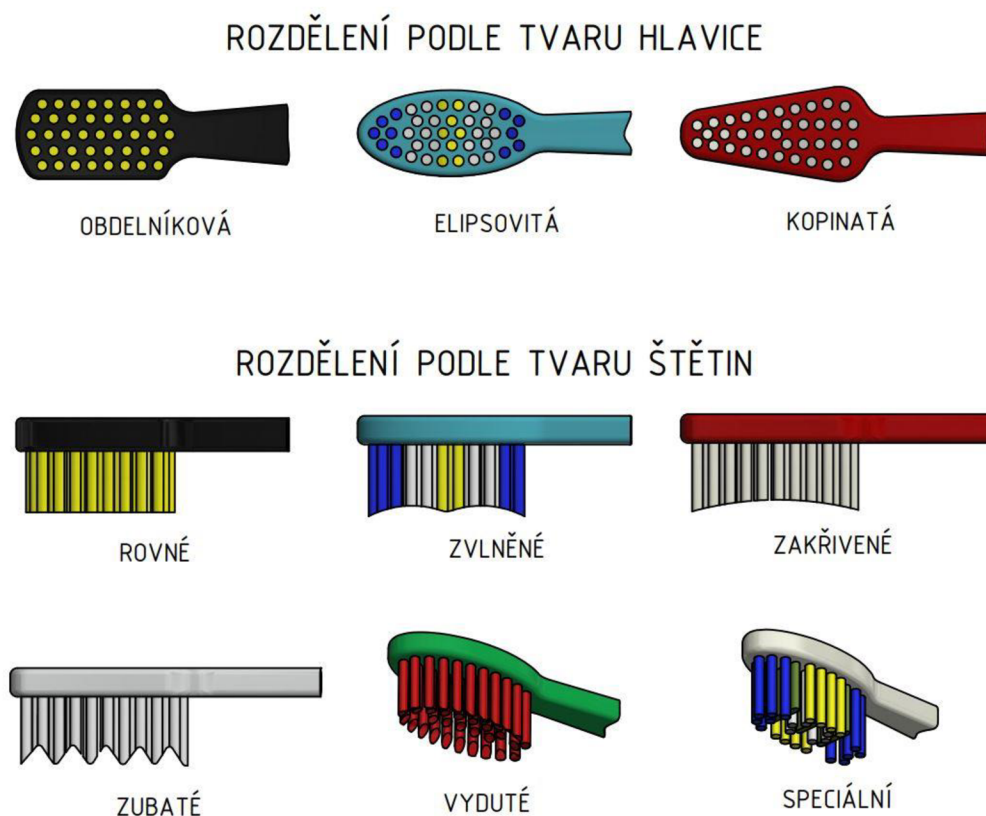


Obr. 2-1 Schéma Interakce mezi kartáčkem a zubem

## 2.1.1 Zubní kartáček

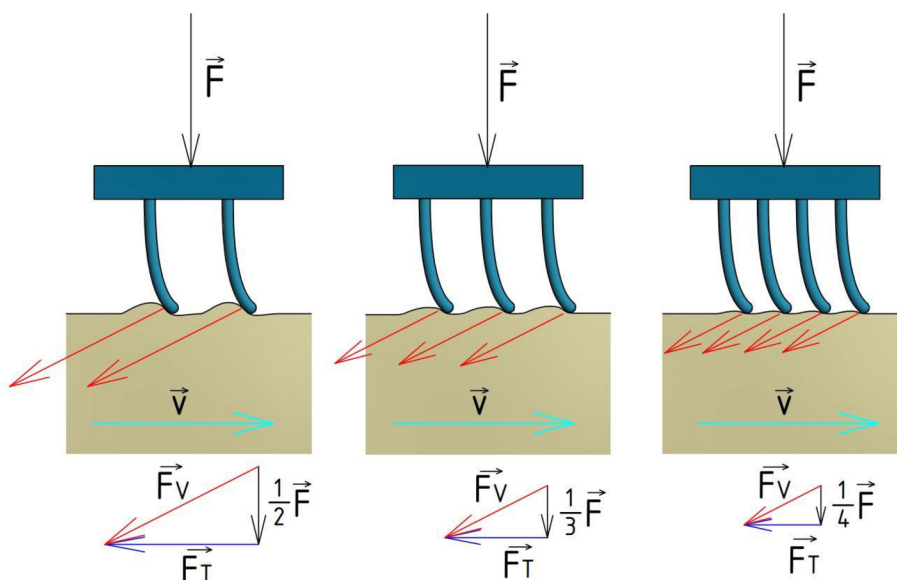
Zubní kartáček je nástroj, který znali starověcí Babyloňané a Egypťané již kolem roku 3500 př. n. l. [3][4]. První dochované kartáčky měly podobu klacíku s jedním rozštěpeným koncem a s druhým ostrým jako párátko [3]. Teprve v 15. století Číňané vynalezli první kartáček s přírodními štětinami. Tyto štětiny byly tvořeny srstí z prasečího krku a byly připevněny k rukojeti z kosti nebo bambusu [3]. Prvním hromadně vyráběným kartáčkem vynalez William Addis v roce 1780 a stejně jako čínské kartáčky z 15. století byl tvořen štětinami z prasečí srsti a ručně vyřezávanou rukojetí z kravské kosti [3][4].

Většina moderních zubních kartáčků využívá jako štětiny vlákna z nylonu (polyamidu) a rukojeť z plastu. Kartáčky se liší především tvarem hlavičky, tvarem štětín, jejich počtem a tvrdostí. Rozdělení podle tvaru hlavičky a podle tvaru štětín je zobrazeno na obrázku 2-2. Toto rozdělení jsem vytvořil na základě nabídek e-shopů a katalogů zubních kartáčků.



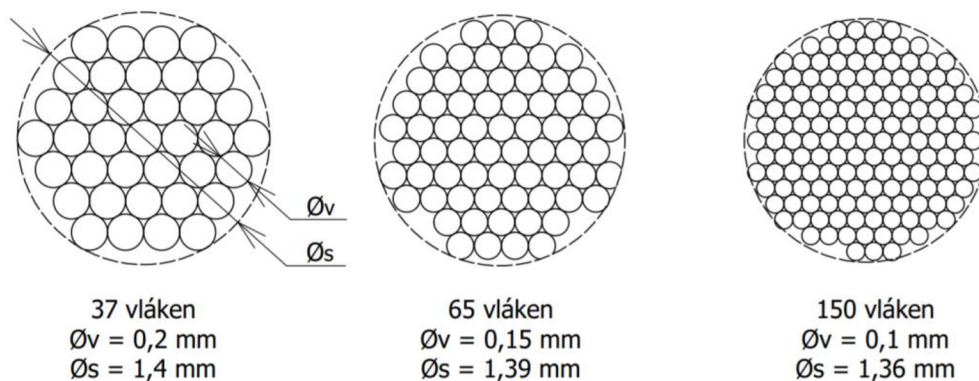
Obr. 2-2 Rozdělení kartáčků podle tvaru hlavičky a tvaru štětín

Značný vliv na interakci mezi kartáčkem a zubem má počet štětín (vláken). Na obrázku 2-3 je schematicky naznačen jejich vliv na rozložení sil na povrchu zubu, případně zubní výplně. Síla, kterou zatěžuje člověk kartáček při čištění zubů, je rozložena do všech štětín, které v daný moment působí na povrch zubu. Se zvětšujícím se počtem štětín se snižuje síla každé štětiny působící na plochu zubu. Díky tomu je povrch v oblasti kde působí méně deformován a nedochází k velkému opotřebení. Například zubní kartáček Curaprox CS Ultra Soft, který je jeden z nejlépe hodnocených zubních kartáčků na trhu, obsahuje okolo 5500 štětín o průměru 0,1 mm [5][6][7]. Obyčejné zubní kartáčky obsahují okolo 500-1000 štětín [6].



Obr. 2-3 Rozložení sil na povrchu zubu: F-Zatěžující síla;  $F_t$ -Třecí síla;  $F_v$ -Výsledná síla;  $v$ -rychlost pohybu

Štětiny jsou u většiny kartáčků uskupené ve svazcích, které jsou upevněny v otvorech na spodní straně hlavice [8]. Na obrázku 2-4 jsou schematicky zobrazeny řezy svazků, na kterých je vidět že svazky mohou být tvořeny několika silnými štětiny nebo desítkami i stovkami slabých štětín. Slabé štětiny se snáze ohýbají, díky čemuž lépe obklopují tvar zubu a rovnoměrněji rozkládají síly na jeho povrchu.



Obr. 2-4 Řez svazky vláken (štětín):  $\varnothing_v$ -průměr vlákna ,  $\varnothing_s$ -průměr svazku

## 2.1.2 Zuby

Zuby jsou tvrdé bílé orgány připomínající kosti, které slouží ke kousání, žvýkání a uplatňují se i při tvorbě řeči (artikulace) [9]. Skládají se ze dvou hlavních částí - korunky, která vystupuje z dásně, a kořene. Korunka je pokryta velmi tvrdou nebuněčnou zubní sklovinou, která je tvořena z 96% hydroxyapatitem [10]. Pod povrchem zubu se nachází dentin (zubovina), který tvoří největší část zubu a určuje jeho tvar [9]. Jádro zubu je tvořeno zubní dřeví, ve které se nacházejí cévy zajišťující výživu a nervy, které v případě poškození zubu vysílají bolest [12].

Na povrchu zubu se neustále vytváří malá vrstva biofilmu, neboli zubního plaku. Biofilm je vrstva organizovaně nahromaděných bakterií, která se vytváří na pevných předmětech ve vlhkém nesterilním prostředí [13]. Tyto bakterie jsou nedílnou součástí tvorby zubního kazu a proto je potřeba je průběžně mechanicky odstraňovat. V případě že se na zubu začne vyskytovat zubní kaz, je nutné nemocné místo odstranit a nahradit jej výplňovým materiálem (plombou). Mezi nejpoužívanější materiály patří amalgám, skloionomerní cement a fotokompozitní pryskyřice (tzv. kompozita) [14].

### Vzorky

Pro naše experimenty budou využity vzorky vyráběné z výplňových materiálů a přesné informace o výrobě těchto vzorků byly poskytnuty od MDDr. Petra Šikuli a jsou uvedeny v následujícím textu, zdroj [15]:

V rámci studie budou testovány vzorky ze čtyř různých kompozitních materiálů a dvou skloionomerních cementů. Světlem tuhnoucí kompozitní materiály se budou lišit mj. velikostí částic anorganického plniva, konkrétně budou připraveny vzorky z kompozitu mikrohybridního (Enamel Plus HRi), nanohybridního (Tetric EvoCeram), nanofilního (Filtek Ultimate) a z nanohybridního ormoceru (Admira Fusion), ze skloionomerních cementů to budou světlem tuhnoucí pryskyřicí modifikovaný skloionomerní cement (Kavitan LC) a skloionomerní cement denzní (GC Equia).

Pomocí silikonové formy budou připraveny vzorky o velikosti (10×10×3) mm. Skloionomerní cementy budou namíchány dle pokynů výrobce a následná polymerace proběhne stejně jako u materiálů kompozitních. Každý vzorek bude polymerován ve dvou vrstvách vždy po dobu 20 s, přičemž druhá polymerace proběhne přes krycí sklíčko, čímž zajistíme hladký povrch vzorku bez nutnosti jeho dalších povrchových úprav. Po polymeraci v silikonové formě budou vzorky skloionomerních cementů opatřeny ochranným lakem (Equia Coat respektive LC Varnish) a tento ochranný lak bude opět polymerován po dobu dalších 20 vteřin. K polymeraci bude použita VALO LED lampa o výkonu 1000 mW/cm<sup>2</sup> a spektru vlnových délek od 390 do 480 nm.



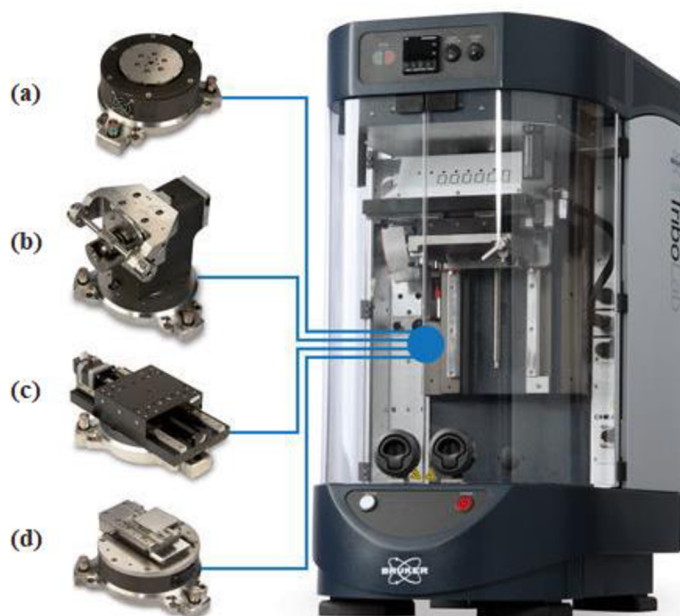
Všechny vzorky budou následně skladovány 31 dní v roztoku umělé sliny (natrii chloridum 0,843 g, kalii chloridum 1,2 g, magnesii chloridum  $\times 6\text{H}_2\text{O}$  0,051 g, calcii chloridum  $\times 2\text{H}_2\text{O}$  0,146 g, natrii fluoridum 0,22 g, dinatrii phosphas  $\times 12\text{H}_2\text{O}$  0,703 g, sorbitolum 30 g, carmellosum natrium 10 g, aqua conservans ad 1000 g) v termostatu při teplotě 37 °C.

## 2.2 Přehled dostupných simulátorů opotřebení zubů

### 2.2.1 Tribometr Bruker UMT Tribolab

Pro náš experiment bude využit simulátor Bruker UMT Tribolab, který je součástí tribologické laboratoře na Ústavu konstruování. Tento simulátor je vysoce univerzální tribometr pro testování mechanických a tribologických vlastností [16]. Platforma Universal Mechanical Tester (UMT), na které simulátor pracuje, je od roku 2000 nejuniverzálnější a nejpoužívanější platformou na trhu [16][17].

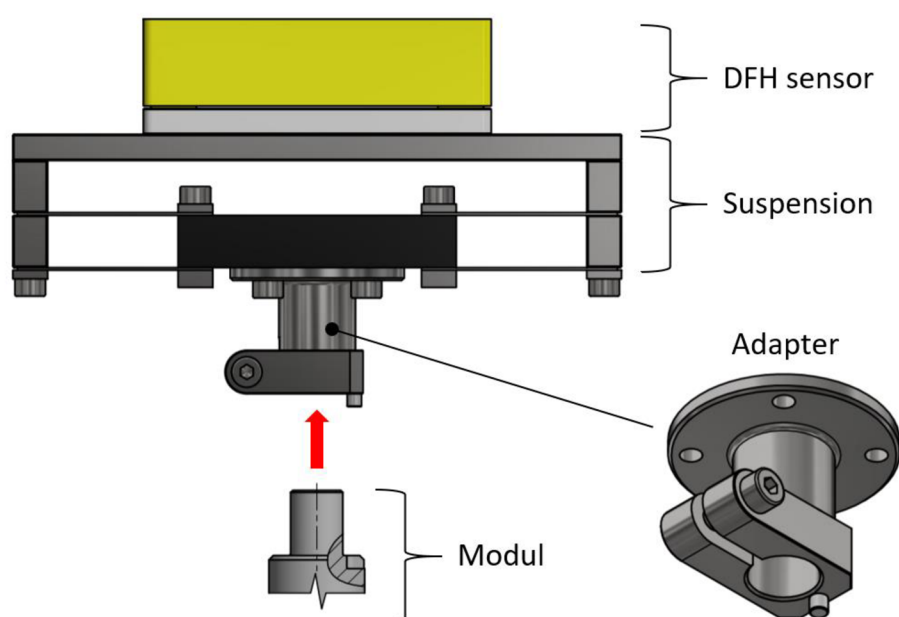
Součástí tribometru Bruker je několik modulů, díky kterým lze nastavit perfektní podmínky pro daný experiment. Moduly v horní části tribometru jsou testovací sondy vybavené citlivými senzory, zaznamenávající působení sil a kroutícího momentu. V dolní části se do kruhové základny aplikují moduly (drivery), které slouží k simulování pohybu testovaného materiálu. Pohyby mohou být lineární (obr. 2-5c), oscilační (obr. 2-5d) a rotační. Rotační pohyb lze zajistit ve vertikální (obr. 2-5a) i horizontální (obr. 2-5b) poloze.



Obr. 2-5 Bruker UMT Tribolab [18]: a) Rotary drive; b) Block-on-ring drive; c) Linear drive; d) Reciprocating drive



Při simulování čištění zubů bude využit reciproční modul (driver tvořící oscilační pohyb), jehož součástí je upínací deska. Na tuto desku se upínají moduly a vany, ve kterých je zafixován zkoumaný materiál, v našem případě vzorek zubní výplně. V desce je několik otvorů se závitem, díky kterým je možné za pomoci šroubů upevnit daný modul. Jelikož bude hybnou částí modul se zafixovaným vzorkem, zubní kartáče musí zůstat nehybný. Ačkoli je při čištění zubů v pohybu kartáček vůči zubu, prohození pohybu nemá žádný vliv na interakci mezi nimi. Upínač (modul), který bude fixovat kartáček se připojí k testovací sondě. Ta je tvořena citlivým DFH senzorem, systémem odpružení (suspension) a adaptérem, viz obr. 2-6. Spojení upínače s adaptérem je zajištěno svěrným spojem se šroubem. Účelem sondy bude zajištění přesného a konstantního zatížení kartáčku a především zaznamenávání třecích sil v průběhu experimentu.



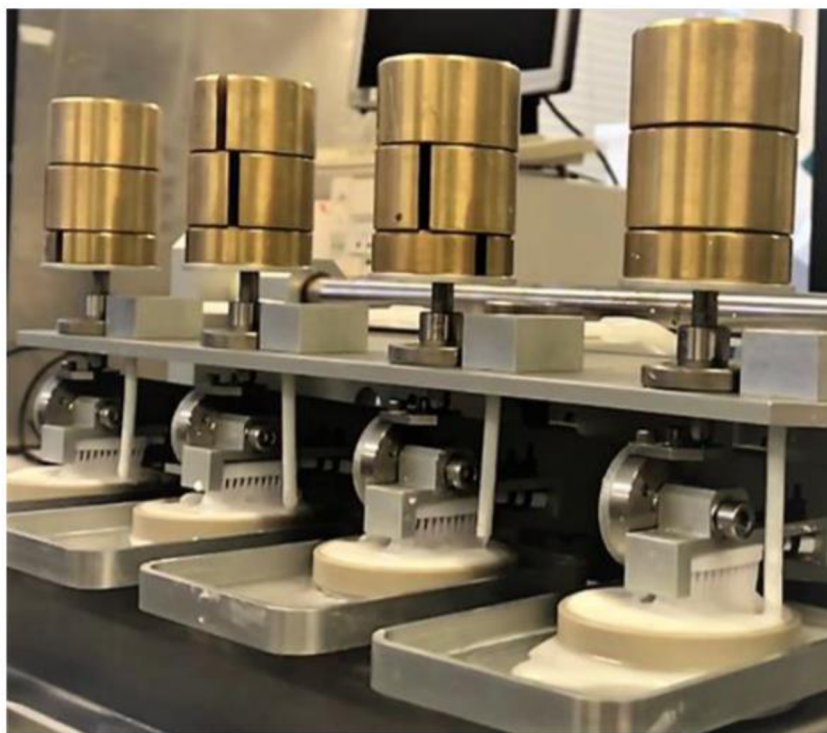
Obr. 2-6 Testovací sonda tvořená DFH senzorem, systémem odpružení (suspension) a adaptérem

Následující kapitoly se zabývají simulátory, které byly využity při různých studiích, především při zkoumání opotřebení zubů vlivem zubního kartáčku nebo zubní pasty. V těchto kapitolách budou rozebrány způsoby upínání zubního kartáčku, vzorku zubu a podmínky experimentu.

## 2.2.2 Simulátor Univerzity v Southamptonu

V roce 2017 byla na universitě v Southamptonu v Anglii provedena studie, zabývající se analýzou tření a opotřebení při čištění zubů. Hlavním cílem bylo prozkoumat vliv používání zubních past na bázi oxidu hlinitého (alumina) a oxidu křemičitého (silica). Dalším cílem bylo také analyzovat hodnoty součinitele tření při používání i nepoužívání zubní pasty. Studie prokázala, že při používání zubní pasty na bázi alumina a na bázi silica dochází k většímu opotřebení zubu než při „suchém“ čištění (tzn. bez použití zubní pasty) [19].

Na obrázku 2-7 je zobrazen simulátor, použitý pro tuto studii. Zatížení kartáčku je zde řešeno pomocí závaží, které tlačí na vrchní část upínače kartáčku. Upínač je tvořen dvěma viditelnými částmi. Jedna část je spojena přes pant s rámem a druhá část, ve které je upevněn kartáček. Tato část má tvar hranaté závorky pro zamezení pohybu kartáčku. Ten je následně zafixován dvěma jednorázovými stahovacími pásky. Na obrázku lze také vidět způsob, jakým je přiváděn mazací film (koncentrát zubní pasty). Ten je do místa kontaktu přiváděn pomocí několika hadiček a pravděpodobně čerpadlem nebo pumpou.



Obr. 2-7 Simulátor University v Southamptonu [19]

Jako vzorky jsou zde využity hovězí zuby, které jsou vloženy do forem a zality epoxidovou pryskyřicí. Po vyjmutí z formy jsou tyto zuby ještě vyleštěny a hydratovány. Finální podoba vzorku je hladký disk o průměru 25mm. Tyto disky jsou v simulátoru uloženy v několika obdélníkových vanách. Přesný způsob upevnění těchto disků nelze z fotografií poznat a v dohledaných textech není uveden. Pravděpodobně se disk uloží, případně přilepí do speciálního kalíšku, který se přišroubuje na dno vany.

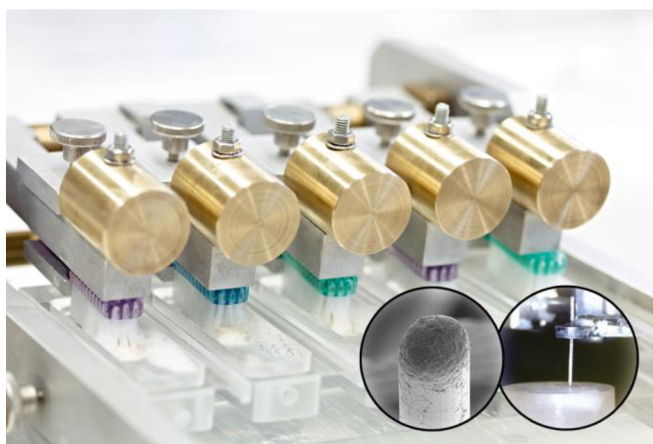
Předností tohoto simulátoru je možnost testování více kartáčku během experimentu, možnost nastavení náklonu štětin a nepřetržitý přívod směsi zubní pasty a umělých slin do místa kontaktu. Na druhou stranu, využití jednorázových stahovacích pásek pro upínání kartáčku mi přijde nevhodné z hlediska ekologie a také kvůli nutnosti použití kombinovaných kleští pro správné dotažení a následné odstřížení přebytku. Přesné uložení vzorku není známo a proto nelze mluvit o jeho výhodách a nevýhodách. Podmínky experimentu, které byly dodrženy při studii Southamptonské university jsou uvedeny v tabulce 2-1.

Tabulka 2-1 Podmínky experimentu - University of Southampton [19]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Zatěžující síla	5	N
Frekvence	4	Hz
Dráha kartáčku	4,9	mm
Teplota	Neuvedeno	°C
Doba měření (s jedním kartáčkem)	120	min
Celková doba měření	360	min

### 2.2.3 Simulátor - Fraunhofer IWM

Druhý simulátor je od instituce Fraunhofer IWM. Tato instituce se zabývá mechanikou materiálu a sídlí ve Freiburgu v Německu [20]. Cílem jejich výzkumu bylo/je testovat několik typů zubních past a jejich vliv na opotřebení zubní skloviny. Simulátor, který pro výzkum využili je vidět na obrázku 2-8.



Obr. 2-8 Simulator - Fraunhofer IWM [21]

Na tomto obrázku si lze všimnout, že způsob zatížení kartáčku funguje na stejném principu jako u předchozího simulátoru. Upínač kartáčku se skládá ze tří hlavních částí. První část je spojena s rámem stroje stejně jako u předchozího simulátoru. Druhá část má tvar písmene C a pomocí šroubu s rýhovanou hlavou (třetí částí), tlačí na kartáček a přimačkává ho na spodní stranu první části. Jako vzorky jsou zde využity skutečné lidské zuby, uložené v obdélníkových vanách, umístěných v řadě vedle sebe. Přesný způsob fixace těchto vzorků jsem nedokázal dohledat a z obrázku uvedeného na webu Phys.org [21] lze jen domýšlet jakým způsobem je fixace provedena. Z tohoto důvodu nelze mluvit o výhodách a nevýhodách uložení vzorku.

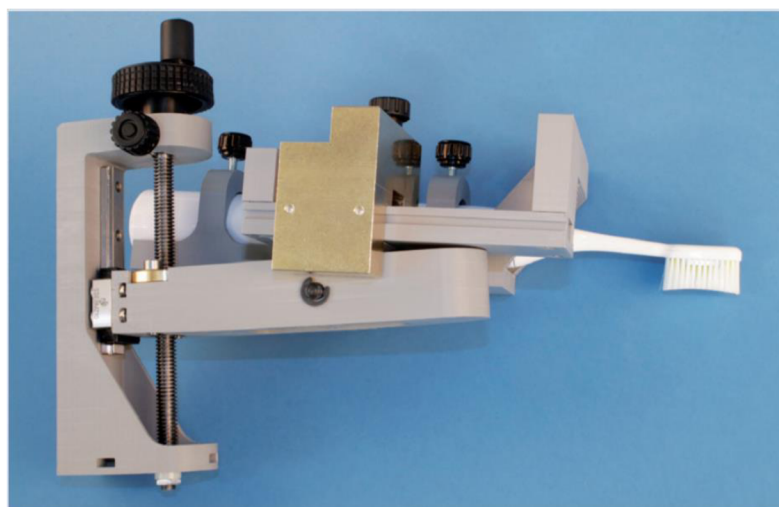
Na druhou stranu jednoznačnou výhodou simulátoru je velmi jednoduché konstrukční řešení upínače kartáčku. Kde díky využití šroubu s rýhovanou hlavou není zapotřebí žádného dalšího nástroje pro fixaci kartáčku. Avšak nevýhodou se zde jeví absence nastavitelnosti náklonu kartáčku a proto je možné upínat jen omezený počet typů kartáčku.

Podmínky, které byly dodrženy při výzkumu se v žádném dohledaném zdroji nenachází.

#### 2.2.4 Simulátor – ZM 3.8

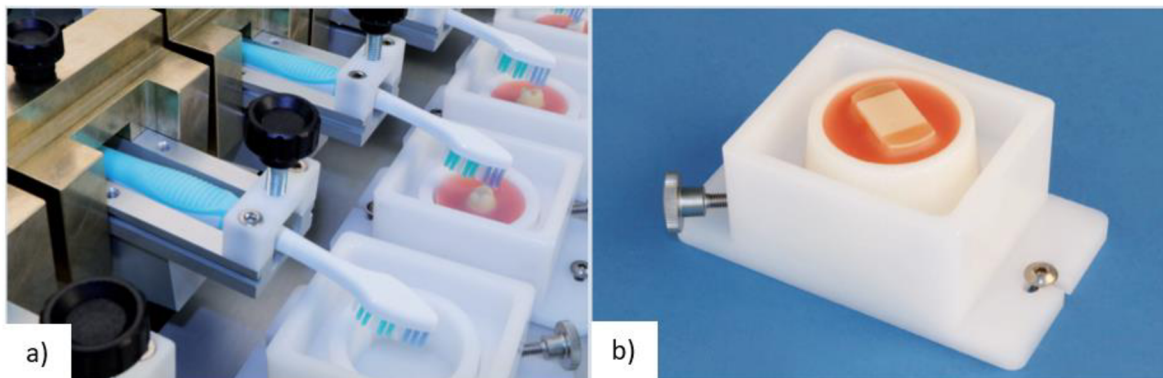
Dalším přístrojem je simulátor od firmy SD Mechatronic, která se od roku 2006 zabývá zkušebními zařízeními, zkouškami tahem, termocyklováním apod. [22]. Tento simulátor disponuje až dvanácti upínači kartáčku a umožňuje několik typů pohybů simulujících čištění zubů. Tyto pohyby lze naprogramovat podle přesných požadavků uživatele.

Upínač kartáčku který lze vidět na obrázku 2-9 je tvořen několika částmi pro zajištění přesného a pevného upnutí. Součástí tohoto upínače je také nastavitelný zdvih, kterým se pravděpodobně nastavuje i zatížení kartáčku na vzorku. Zubní kartáček je zde upínán za jeho rukojeť. Fixace kartáčku je zajištěna pomocí několika šroubů s plastovou hlavou pro snadné utahování.



Obr. 2-9 Upínač kartáčku – ZM-3.8 [22]

Na obrázku 2-10 lze vidět princip uložení vzorku. Zub (2-10a), případně vzorek zubní výplně (2-10b), je zapuštěn v kruhové základně epoxidovou pryskyřicí. Tato základna se nachází uprostřed obdélníkové vany, která je pomocí dvou šroubů připevněna k pohyblivé části simulátoru. Na obrázku 2-10b si také lze všimnout šroubu s rýhovanou hlavou. Jeho funkce je pravděpodobně zajištění kruhové základny uvnitř vany.



Obr. 2-10 Uložení vzorku – ZM-3.8; a) Zapuštění zubu; b) Zapuštění vzorku zubní výplně; Vytvořeno kompilací obrázků ze zdroje [22].

Hlavní výhodou simulátoru je programovatelnost různých typů pohybů kartáčku vůči zubu, a možnost testování velkého množství vzorků naráz. Ačkoli lze na upínači nastavit přesnou polohu zubního kartáčku a je možné upnout všechny typy kartáčku, jeho konstrukce je velmi složitá a nastavení zatížení kartáčku je spíše založené na odhadu obsluhy zařízení. Zatvrdnutí vzorku v pryskyřici je sice velmi universální metodou, ale zároveň časově velmi náročnou. Parametry, které lze na simulátoru nastavit jsou vypsány v tabulce 2-2.

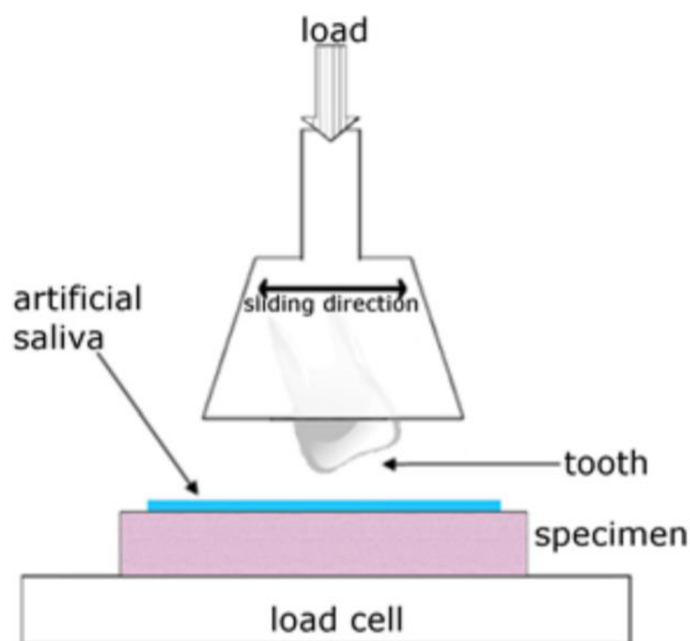
Tabulka 2-2 Nastavitelné parametry – ZM 3.8 [22]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Zatěžující síla	~(0–3)	N
Rychlost pohybu	1-30	mm / s
Dráha kartáčku	1-15	mm
Teplota	Max. 40	°C
Maximální počet cyklů	4 000 000	-



## 2.2.5 Simulátor – Princip zub-zub

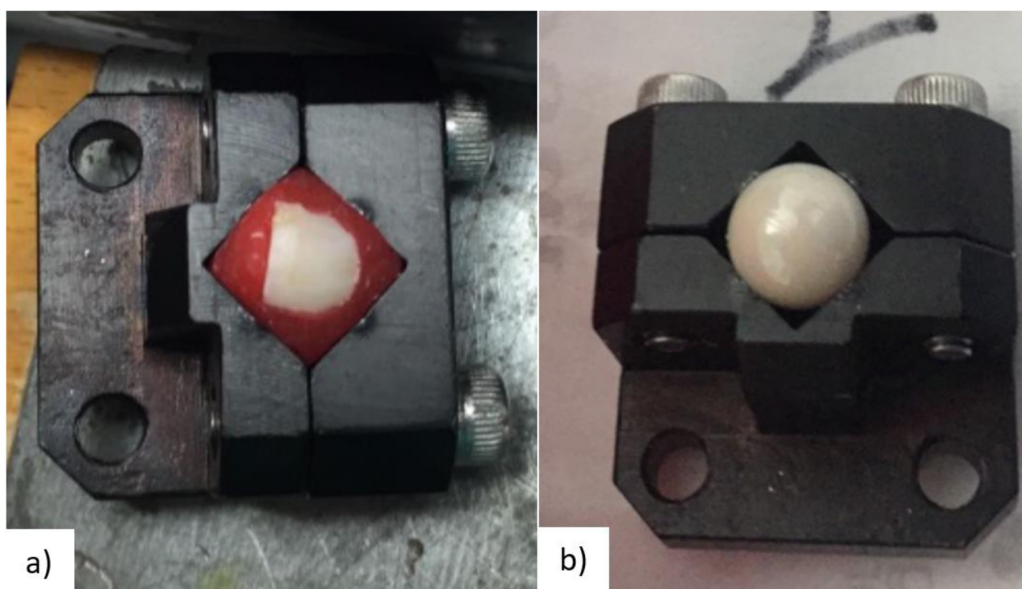
V roce 2018 byla ve Španělsku provedena studie [23], která se zabývala vzájemným působením zubů (například při žvýkání potravy). Cílem této studie bylo zjistit součinitel tření mezi zubem a keramickou náhradou zubu, případně mezi dvěma keramickými náhradami. Pro tento výzkum byl využit simulátor, jehož hlavní částí byl biotribometr TR-BIO 282, který zaznamenával třecí síly mezi vzorky a následně odvodil součinitel tření. Schéma tribologické dvojice zub-zub je zobrazeno na obrázku 2-11. V horní části simulátoru se nachází upínač zubu (keramické náhrady). Tato část je hybnou a zároveň zatěžující složkou simulátoru. V dolní části se nachází sonda, která zaznamenává třecí sílu. Na této sondě je připevněn vzorek keramické náhrady zubu, který má tvar čtvercové destičky. Popis zafixování tohoto vzorku dokument [23] neobsahuje a proto není možné jej blíže specifikovat.



Obr. 2-11 Princip zub-zub (Tooth-to-tooth contact) [23]

Ačkoli se nejedná o simulátor čištění zubů, upínač vzorku, který je zde využit je možné použít i pro náš simulátor. Na obrázku 2-12 si lze všimnout jednoduchého principu upínání vzorku v čelistech. Tyto čelisti jsou tvořeny dvěma součástmi, které jsou k sobě přitlačovány šrouby. V upínači lze aplikovat čtvercový i kulový tvar vzorku.

Do tohoto upínače je reálně možné upínat i naše vzorky zubní výplně. V našem případě je vzorek zubu upínán v dolní části simulátoru a proto by bylo nutné jej opatřit vanou, aby nedocházelo k úniku maziva do prostoru simulátoru. Přesto se jedná o relativně jednoduché řešení a snadné upínání.



Obr. 2-12 Upínač vzorku pro simulátor - Tooth-to-tooth contact; a) Upínač se vzorkem zubu; b) Upínač se vzorkem keramické náhrady zubu; Vytvořeno kompilací obrázků ze zdroje [23].

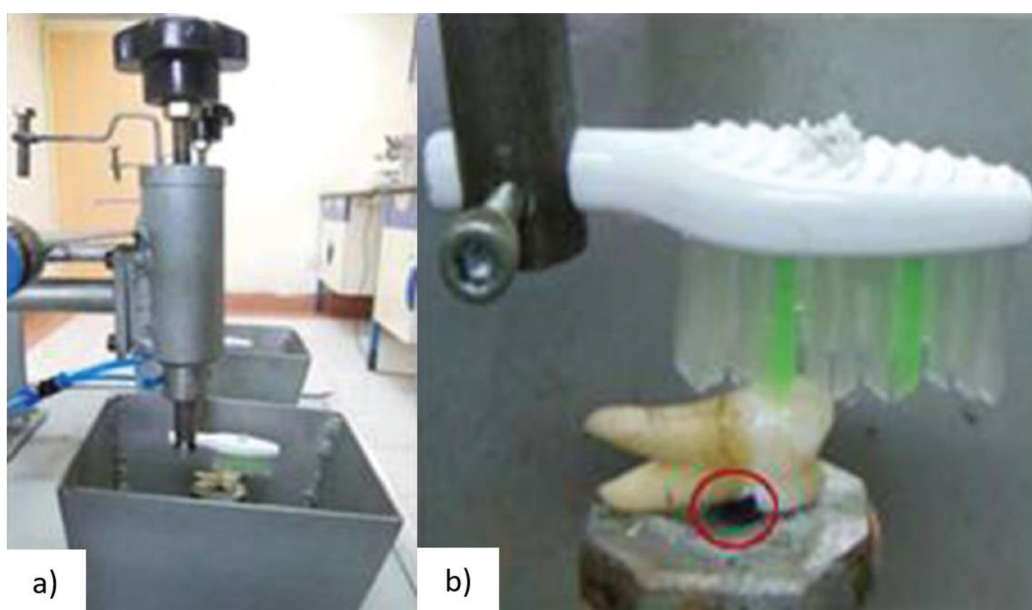
I přesto, že se nejedná o simulování pohybu kartáčku při čištění zubů, podmínky experimentu principu zub-zub budou zahrnuty do určování podmínek našeho experimentu. V tabulce 2-3 jsou vypsané důležité podmínky experimentu.

Tabulka 2-3 Podmínky experimentu - Tooth-to-tooth contact [23]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Zatěžující síla	20	N
Frekvence	5	Hz
Dráha	2	mm
Teplota	20±1	°C
Doba experimentu	60	min

## 2.2.6 Simulátor pro analýzu iterace zubní pasty a zubu

V roce 2016 byla v Novém Dillí v Indii provedena studie, která se zabývala vlivem zubních past a zubních prášků na opotřebení tvrdých zubních tkání [24]. Pro tuto studii byl použit podomácku vyrobený simulátor, který simuloval pohyb kartáčku po povrchu zubu, viz obr. 2-13a. Hybným prvkem tohoto simulátor je vrchní část, ve které se nachází zátěžové zařízení (pravděpodobně závaží nebo pružina uvnitř válce) a upínač kartáčku. Dolní část simulátoru tvoří kontejner (vana) a platforma, na kterou se připevňuje vzorek (lidský zub). Ten je k platformě připevněn pomocí lepidla, viz obr. 2-13b. Koncentrát zubní pasty je do místa kontaktu přiváděn hadičkami pomocí čerpadla.



Obr. 2-13 Simulátor pro analýzu iterace zubní pasty a zubu; a) Podomácku vyrobený simulátor; b) Detail na upínač kartáčku a připevnění vzorku pomocí lepidla. Vytvořeno kompilací ze zdroje [24].

Upínač kartáčku zde tvoří obyčejná kruhová tyč v jejíž dolní části se nachází dva otvory. Jeden větší, do kterého se vkládá krček kartáčku a druhý se závitem, ve kterém se nachází šroub fixující kartáček. Tento způsob upínání je velmi prostý a efektivní ale nedovoluje nastavení náklonu kartáčku a pravděpodobně není možné upnout více typů kartáčku bez větších úprav (zabroušení jejich krčku).

Jelikož se jedná o podomácku sestrojený simulátor, upínání vzorku je zde řešeno velmi prostě pomocí lepidla. To může mít za následek náhlé uvolnění vzorku v průběhu experimentu. Zároveň hrozí poškození vzorku při jeho odstraňování z platformy.



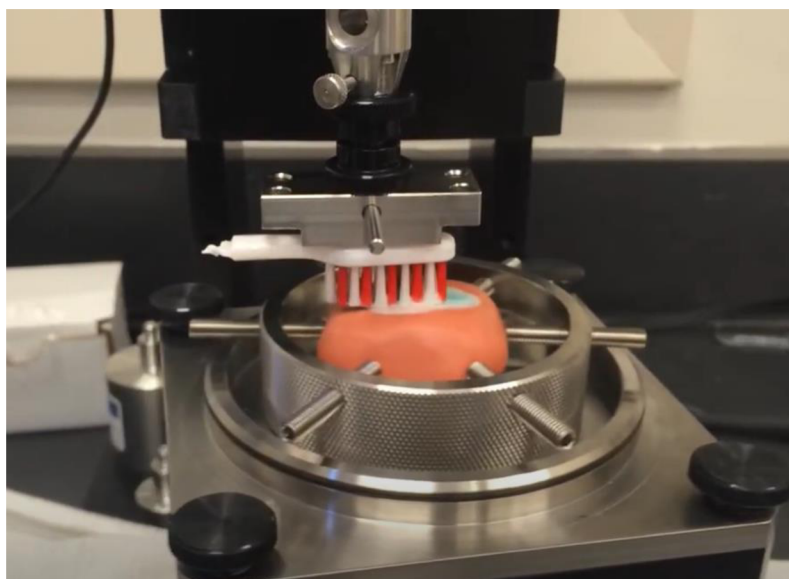
Tato studie se zabývá problematikou opotřebení zubů při používání různých typů zubních past. Experimenty, které byly prováděny pro určení tohoto opotřebení se nijak neliší od těch našich. Proto budou podmínky experimentu této studie zahrnuty do určení těch našich. Podmínky experimentů pro analýzu iterace zubní pasty a zubu jsou vypsány v tabulce 2-4.

Tabulka 2-4 Podmínky experimentu pro analýzu iterace zubní pasty a zubu [24]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Zatěžující síla	2	N
Frekvence	3,33	Hz
Dráha	neuveďeno	mm
Teplota	neuveďeno	°C
Doba experimentu	150	min

### 2.2.7 Simulátor Mach-1

Poslední zmíněný simulátor je od společnosti Biomomentum Inc, která se od roku 1999 zabývá výrobou multiaxiálních mechanických testů [25]. K simulátoru, který je na obrázku 2-14 se mi podařilo dohledat pouze krátké video [26], ze kterého lze popsat způsob upínání kartáčku a vzorku. Dále je možné z tohoto videa odhadnout délku dráhy kartáčku a frekvenci pohybu.



Obr. 2-14 Simulátor Mach-1; Snímek byl pořízen z videa [26], v čase 0:09.

V horní části simulátoru se nachází upínač kartáčku. Upínání je zde řešeno zřejmě pomocí lepidla, které se nanáší na hlavici kartáčku. Ta se nalepí na spodní stranu upínače. Jedná se o velice prostý způsob upínání kde hrozí velké riziko uvolnění kartáčku v průběhu experimentu. Čas přípravy experimentu a výměny kartáčku se také prodlouží.

Vzorek zubu, případně zubní výplně, je zatvrdnut v modelovací hmotě, která je pomocí několika stavěcích šroubů zafixována uprostřed kruhové vany. Tento princip upínání je vhodný, pokud využíváme více druhů vzorů. Na druhou stranu je čas přípravy velmi zdlouhavý a při odstraňování vzorku z modelovací hmoty může dojít k jeho poškození.

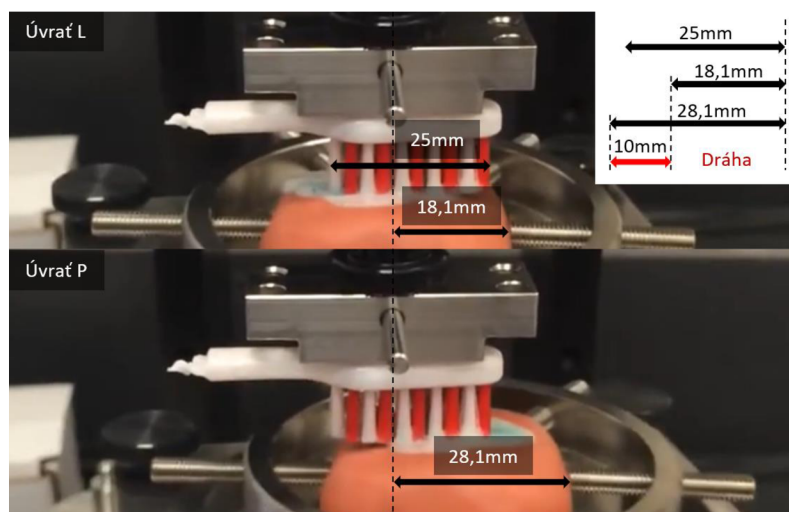
Podmínky experimentu, které lze z videa odhadnout jsou frekvence a velikost dráhy kartáčku. Frekvence je vypočtena podílem počtu kmitů a časové délky videa, viz následující rovnice:

$$f = \frac{n}{t} = \frac{17}{12} = 1,42 \text{ Hz} \quad (2.3)$$

Kde:

$n$	[-]	počet kmitů
$t$	[s]	časová délka videa
$f$	[Hz]	frekvence

Velikost dráhy kartáčku byla odhadnuta pomocí dvou snímků, které byly umístěny nad sebe a vystředěny přes společný nehybný bod (otvor pro čep v upínači kartáčku), viz obr. 2-15. První snímek byl pořízen ve chvíli, kdy se vana se vzorkem nacházela v levé úvratí, druhý byl pořízen v pravé úvratí. Délku hlavice kartáčku jsem odhadnuta na 25 mm, na základě podobnosti s kartáčkem od firmy TePe. Díky tomuto odhadu bylo možné si vytvořit měřítko obrázku. Dráha pohybu kartáčku byla určena jako změna vzdáleností hybného bodu od osy obrázku a její velikost je rovna 10 mm. Dráha pohybu a frekvence budou zahrnuty do určování podmínek experimentu.



Obr. 2-15 Určení dráhy pohybu kartáčku; Vytvořeno kompilací snímků z videa [26].

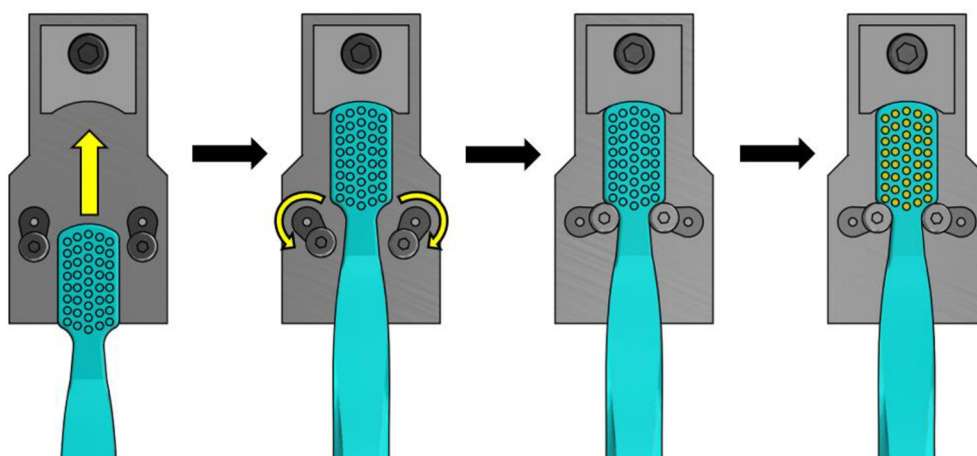
## 2.2.8 Výroba zubních kartáčků

Tato kapitola se zabývá výrobním procesem, při kterém se do hlavice kartáčku umísťují štětiny a následně zabrušují do požadovaného tvaru. Při tomto procesu jsou hlavice kartáčků upnuty ve speciálních přípravcích (upínačích), viz obr. 2-16. Ačkoli se nejedná o simulátor nebo jiné zařízení zaměřené na naši problematiku, zahrnul jsem pro inspiraci tento výrobní proces mezi ostatní kapitoly.



Obr. 2-16 Výroba zubních kartáčku Spokar [27][28].

Princip upínání spočívá v sevření hlavice mezi dorazem a dvěma svěrkami. Tyto svěrky jsou pneumaticky nebo elektronicky natočeny tak, aby tlačily hlavici kartáčku k dorazu a zároveň svíraly krček kartáčku mezi dvěma kuželovými plochami. Díky tomuto automatizovanému upínání je možné velmi rychle a přesně zajistit polohu kartáčku [8]. Přesný princip upínání je schematicky zobrazen na obrázku 2-17.



Obr. 2-17 Princip upnutí kartáčku – Přiložení, natočení svěrek, fixace, vložení štětín do hlavice kartáčku.

## 2.3 Podmínky experimentu

Tato kapitola se zabývá určením podmínek (parametrů) experimentu našeho simulátoru. Aby byly možné analyzovat věrohodné výsledky, je nutné dodržovat stálé podmínky při všech experimentech. Nejdůležitějšími parametry jsou zatěžující síla, frekvence a dráha pohybu kartáčku, viz tabulka 2-5. Tyto parametry byly stanoveny na základě analýzy již provedených studií a konzultací se stomatology z Masarykovi univerzity. Dalšími důležitými parametry jsou teplota vzorku a doba experimentu. Teplota vzorku byla zvolena tak, aby odpovídala průměrné teplotě lidského těla a doba experimentu byla vypočtena na 45 minut, což přibližně odpovídá jednomu roku čištění zubu v lidském životě. Tento výpočet je dán vztahem:

$$t_{exp} = 365 \cdot \frac{t_{\check{z}}}{z} = 365 \cdot \frac{4}{32} = 45,6 \approx 45 \text{ min} \quad (2.4)$$

Kde:

$t_{exp}$  [min] Doba experimentu

$t_{\check{z}}$  [min] Doba čištění zubů denně ( 2 min ráno, 2 min večer)

$z$  [-] Počet zubů dospělého zdravého člověka

Pokud by opotřebení na vzorcích nebylo dostatečně prokazatelné, bude doba měření zvýšena na dvojnásobek.

Tabulka 2-5 Souhrn experimentálních podmínek z různých studií včetně podmínek, které budou použity v našem experimentu.

Simulátor [číslo kapitoly]	Zatěžující síla [N]	Frekvence [Hz]	Dráha [mm]	Teplota [°C]	Doba exp. [min]
Simulátor 2.2.2	5	4	4,9	-	120
Simulátor 2.2.4	1–3	-	1–15	max. 40	-
Simulátor 2.2.5	20	5	2	20±1	60
Simulátor 2.2.6	2	3,33	-	-	150
Simulátor 2.2.7	-	1,42	10	-	-
Simulátor ÚK	2-3	3	6-10	37	45-90

Další nezbytnou podmínkou, kterou je nutné při experimentech dodržovat je kolmost štětín vůči vodorovné ploše vzorku. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, mohlo by docházet k rozdílným výsledkům opotřebení na vzorcích, vlivem nerovnoměrného zatížení štětín na povrchu vzorku.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Na základě rešerše dostupných simulátorů analýzy opotřebení zubů při čištění lze podotknout několik problémů. Pravděpodobně největším problémem většiny simulátorů je omezené množství typů kartáček, které lze v simulátoru aplikovat. Upínače jsou často složité nebo nepraktické. Stejně tak to platí pro ukládání (upínání) vzorku zubu nebo zubní výplně. Dalším problémem dohledaných výzkumů byla absence zahrnutí reálné teploty do podmínek experimentu, díky čemuž mohou být výsledky těchto výzkumů nevěrohodné.

Nyní byl zahájen nový výzkum, který vznikl ve spolupráci se stomatology s Masarykovi univerzity, pro který je důležité sestavit simulátor vytvářející věrohodné výsledky analýzy tření a opotřebení zubů při čištění. Cílem výzkumu bude analyzování abrazivity několika druhů zubních past a také testování zubních kartáčků. Pro tento výzkum bude využit komerční simulátor Bruker UMT TriboLab, pro který je nutné zkonstruovat univerzální upínač kartáčku a vanu (upínač), ve které bude uložen vzorek. Tyto přípravky musí být navrženy tak, aby bylo možné zaručit podmínky experimentu, které jsou uvedeny v kapitole 2.3.

### 3.2 Cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je konstrukční návrh upínače zubního kartáčku a vany, do které se uloží vzorek zubní výplně. Upínač kartáčku musí umožňovat fixaci několika typů zubních kartáčků a musí být zajištěna kolmost štětin vůči vodorovné ploše vzorku. Vana musí zajistit mazání kontaktní dvojice roztokem umělých slin a zubní pasty a také vyhřev vzorku na danou teplotu. Dále je nutné vytvoření výrobních výkresů jednotlivých součástí a zajištění výroby. Po zhotovení součástí přípravků je nutné provést montáž, po které bude následovat realizace experimentu, jehož pomocí se otestuje funkčnost jednotlivých upínačů. Posledním cílem je analýza součinitele tření kontaktní dvojice kartáček-vzorek, provedena na validačním experimentu.

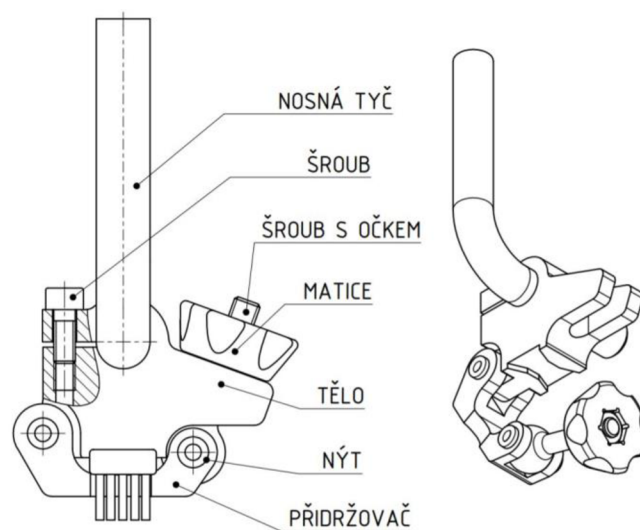
## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

### 4.1 Koncepty upínače kartáčku (UK)

Tato kapitola se zabývá několika koncepty upínače kartáčku, jejichž společným prvkem je válcové zakončení ve vrchní části upínače, které se zasouvá do adaptéru simulátoru Bruker. Dalším společným prvkem je aretační drážka nacházející se pod válcovým zakončením.

#### 4.1.1 UK I

Prvním koncepčním řešením je UK I, které je založeno na principu sevření kartáčku v „čelistech“. Na obrázku 4-2 lze vidět, že čelisti jsou tvořeny tělem a přídržovačem, navzájem jsou spojeny nýtem, který vytváří pant. Po vložení krčku kartáčku (zúžená část za hlavicí) do vyfrézované drážky je přídržovač přitlačován směrem k tělu pomocí šroubu s očkem a pomocí matice, která se opírá o šikmou plochu těla. Šroub s očkem je pomocí nýtu připevněn k přídržovači. Tělo upínače je svěrným spojením připevněno k nosné tyči, která je následně zavedena do adaptéru. Nosná tyč pro jednoduchost neobsahuje drážku pro aretaci.



Obr. 4-1 UK I; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

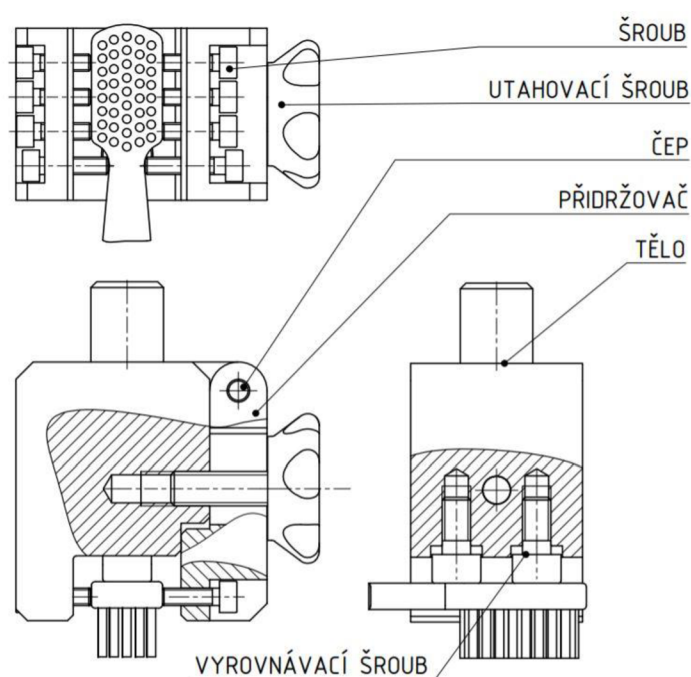
Předností tohoto řešení je především snadné a rychlé upnutí kartáčku, relativně malá hmotnost a jednoduchá konstrukce. Na schématu si lze také všimnout, že tělo se dá na horizontální ose posouvat, což může být výhodou při nastavování polohy kartáčku vůči vzorku.

Do UK I lze upínat jen kartáčky se stejnou výškou profilu, což je velkým nedostatkem. V případě, že je krček zahnutý, nelze zajistit kolmost štětin vůči vzorku.



## 4.1.2 UK II

V případě UK II se jedná o upevnění hlavice kartáčku pomocí šroubů. Na obrázku 4-3 je vidět, že je upínač rozdělen na dvě části, tělo a přídržovač, které jsou spojeny čepem. Toto rozdělení slouží k usnadnění vyjmutí kartáčku. Šrouby jsou umístěny v řadě proti sobě v obou částech UK. V první fázi se nastaví vyrovnávací šrouby tak, aby byl po přiložení kartáčku profil ve stejné výšce jako šrouby. Vyrovnávací šrouby navíc slouží k zajištění kolmosti štětin vůči vzorku. V další fázi je na vyrovnávací šrouby přiložena hlavice kartáčku a následným dotahováním šroubů po stranách se zajistí upnutí (v této fázi je utahovací šroub utážen). Třetí fází je instalace UK II do adaptéru měřicího zařízení. V případě, že bude zapotřebí v průběhu experimentu vyměnit kartáček, stačí už jen povolit utahovací šroub a kartáček vyměnit.



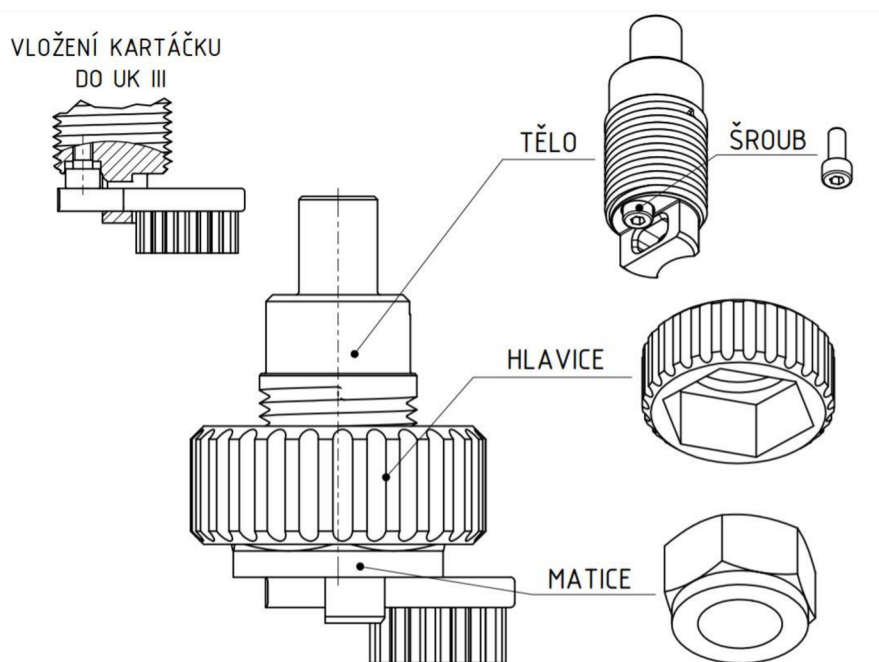
Obr. 4-2 UK II; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

Výhoda koncepčního řešení UK II je v přesném a pevném upnutí hlavice kartáčku, bez ohledu na její tvar. Malou nevýhodou je zdoluhavé nastavování šroubů. Na druhou stranu, v případě opakovaného upínání stejného typu kartáčku je díky dvoudílné konstrukci (tělo, přídržovač) zajištěna rychlá instalace.

Problémem této konstrukce je riziko možné kolize mezi UK a vanou, ve které je upevněn vzorek. Na schématu je vidět, že spodní hrany těla a přídržovače jsou relativně nízko pod profilem kartáčku. Při velkém zatížení nebo dlouhé době měření dochází k většímu ohýbání štětin a tím ke snížení vzdálenosti mezi UK a vanou. V případě, že nastane kolize, může dojít k poškození modulu případně čidla měřicího zařízení.

### 4.1.3 UK III

Koncepční řešení UK III, které je zobrazeno na obrázku 4-4, je tvořeno maticí a tělem, které z velké části tvoří závit. V těle je ještě zabudovaný šroub, zajišťující kolmost štětin a správné sevření kartáčku. Kartáček se vkládá do otvoru těla tak, aby hlavice byla doražena do kruhové drážky. Krček musí být podepřen šroubem. V případě, že krček nedosahuje ke šroubu, je zapotřebí na kartáčku zanechat část rukojeti. Matice je pak šroubována směrem ke kartáčku a tím dochází k jeho sevření. Na matici může být nalisována hlavice, vyrobená pomocí metody 3D tisk, sloužící k usnadnění utahování.



Obr. 4-3 UK III; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

UK III je velmi elegantním řešením, jelikož se skládá jen z jedné obráběné součásti a normalizované matice a šroubu. Výrobní náklady jsou díky jednoduché konstrukci velmi nízké. V případě použití hlavice je upínání velmi jednoduché.

Nevýhodou se stává hmotnost celého konceptu. Kvůli velkému otvoru pro krček je závit relativně velký, proto je zapotřebí objemnějšího těla a velké matice. Dalším nedostatkem je vznikající deformace kartáčku při utahování. V místě kontaktu krčku a těla dochází vlivem utahování k ohybu, čímž nejsou štětiny kolmé ke vzorku. Tento problém lze vyřešit větším vysunutím šroubu, ale to má za následek zdlouhavé nastavování upínače.

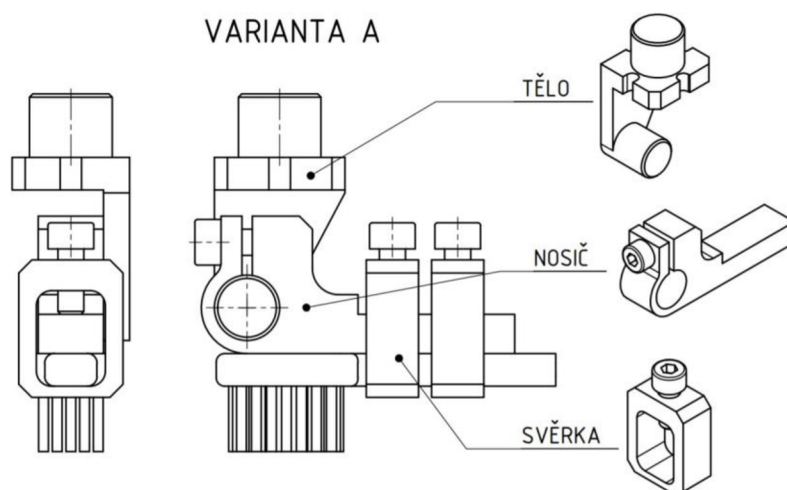


#### 4.1.4 UK IV

Další koncepční řešení je navrženo se zvýšeným důrazem na úplnou nastavitelnost. UK IV se skládá ze dvou hlavní částí (tělo a nosič), které jsou spojeny svěrným spojením se šroubem, viz obrázek 4-5. Podstata svěrného spojení se šroubem spočívá v tom, že utažením šroubu vznikne ve stykových plochách spojovaných částí tření, které zajistí jejich pevné spojení [29]. Díky tomuto spojení je možné nastavit sklon kartáčku a tím zajistit kolmost štětin. Pro upevnění kartáčku k nosiči jsou navrženy dvě varianty (varianta A, varianta B).

##### Varianta A

Tato varianta využívá k upevnění kartáčku svěrky, které pomocí šroubů přitlačují kartáček k nosiči. Svěrky jsou vyrobeny z obdélníkových profilů, které jsou následně frézované. Další možnost výroby svěrek je navařením matic na nařezané jekly. K upevnění jsou zapotřebí aspoň dvě svěrky. Podobný princip upínání lze vidět u simulátoru - Fraunhofer IWM (kapitola 2.2.3)



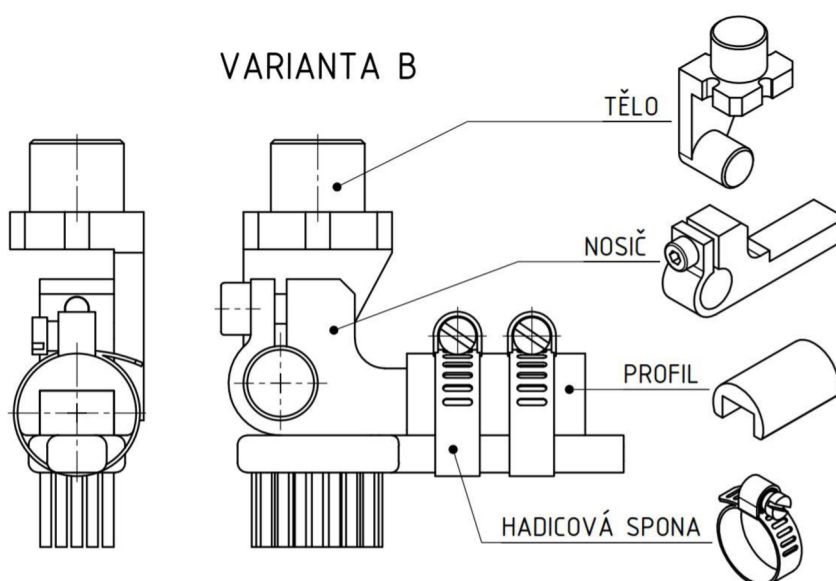
Obr. 4-4 UK IV – Varianta A; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

Výhodou UK IV s upínací variantou A je přesné nastavení sklonu a to pro jakýkoliv typ kartáčku. Nastavení sklonu můžeme změnit i v průběhu měření. Řešení UK je relativně jednoduché a hmotnostně vyhovující.

Problém může nastat tehdy, pokud má kartáček příliš zahnutou rukojeť. V této chvíli je však zapotřebí velký sklon nosiče, který způsobí to, že spodní hrana poslední svěrky je jen pár milimetrů nad okrajem vany, ve které je uložen vzorek. V případě, že se v průběhu experimentu zmenší vzdálenost mezi UK a vzorkem, způsobená větším ohýbáním štětin, nastává riziko kontaktu stejně jako v případě UK II (kapitola 4.1.2). Řešením je zmenšení stěny svěrky pod kartáčkem, aby nedošlo ke kolizi.

## Varianta B

Na obrázku 4-6 si lze všimnout že varianta B na rozdíl od varianty A obsahuje další část (profil), která vytváří na nosiči válcovou plochu. Tato plocha slouží k nasazení hadicových spon, které nahrazují funkci svěrek. Válcová plocha je nutná, aby nedocházelo k příliš velké deformaci spon a jejich následnému zničení. Profil by se dal nahradit jiným nosičem s válcovým zakončením, ale to by bylo cenově nákladnější. Hadicové spony ideálně řeší problém varianty A. Jsou vyráběny z plechů o malé tloušťce a tím, i při větším zatížení, nedojde ke kontaktu UK s vanou. Podobný princip upínání byl použit u simulátoru Univerzity v Southamptonu (kapitola 2.2.2), kde místo hadicových spon využívali jednorázové stahovací pásy.



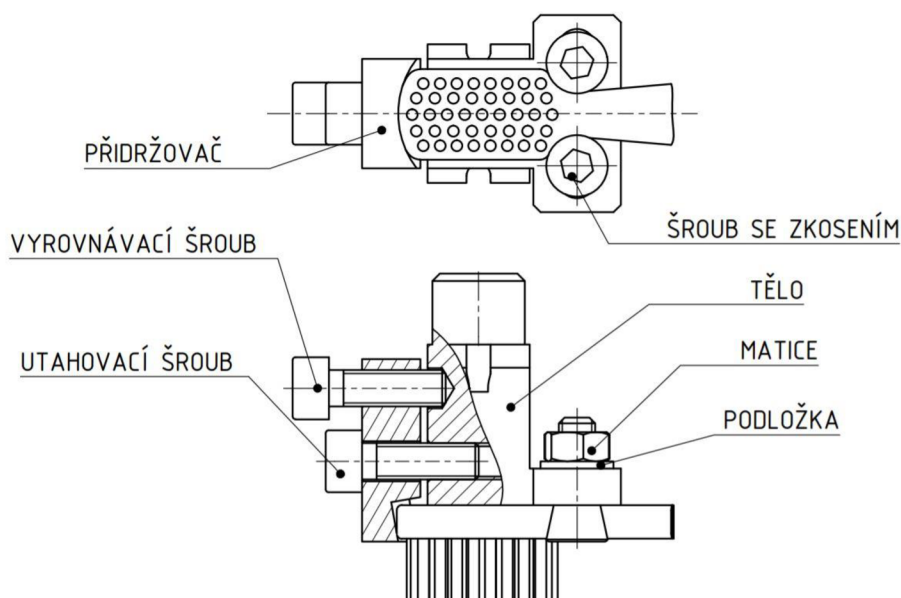
Obr. 4-5 UK IV – Varianta B; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

Použitím hadicových spon se ukázaly další výhody UK IV především v tom, že při utahování spony dochází k vystředění kartáčku na nosiči. Spona se mnohem lépe přizpůsobuje tvaru rukojeti na rozdíl od svěrek a tím dochází k pevnějšímu sevření.

Na druhou stranu přidáním profilu dochází ke zvětšení hmotnosti a také ke špatnému rozdělení váhy působící na senzor, což by mohlo mít nežádoucí účinky na výsledky experimentu. V případě výroby součástí pro variantu A i B se jedná o relativně drahé řešení.

#### 4.1.5 UK V

Posledním koncepčním řešením upínače kartáčku je UK V, který svou konstrukcí řeší problémy všech předešlých variant. Na obrázku 4-7 si lze všimnout principu upnutí. Kartáček je vložen pod tělo UK tak, aby byl krček umístěn mezi dva šrouby se zkosenou hlavou a následně přimáčknut přídržovačem. Ten je k tělu přitlačen pomocí utahovacího šroubu. Dále je v přídržovači umístěn vyrovnávací šroub, který má funkci udržet součást ve svislé poloze a rovnoměrně rozložit síly. Šrouby se zkosením jsou umístěny v drážkách v zadní části těla a utaženy matkou. Tyto šrouby lze v drážkách posouvat a tím přizpůsobit upínač rozměrům krčku kartáčku. Jelikož hlavice doléhá na vodorovnou plochu těla, je zajištěna kolmost štětín vůči vzorku. Tento způsob upínání byl inspirován samotnou výrobou zubních kartáčků, viz kapitola 2.2.8.



Obr. 4-6 UK V; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

Řešení UK V splňuje všechny požadované podmínky. Díky této konstrukci je možné upnout všechny komerční typy zubních kartáčků a díky malým rozměrům nenastává riziko kontaktu upínače s vanou. Hmotnost je nízká a dobře vyvážená. Jediným nedostatkem konceptu je složitější tvar těla.

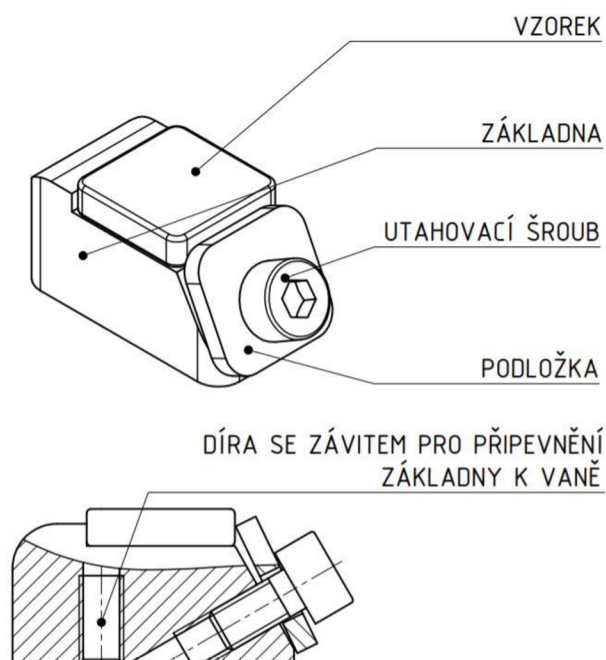
Po vyrobení a otestování prototypů byl pro výrobu schválen UK V. Jeho konstrukčním řešením a výrobou se zabývá kapitola 5.

## 4.2 Koncepty upínače vzorku (UV)

Před samotným návrhem vany bylo zapotřebí nejprve navrhnout princip upínání vzorku uvnitř vany. V následujících kapitolách jsou zobrazeny a popsány 4 různé upínače, které byly pro návrh vany zvažovány.

### 4.2.1 UV I

První koncept UV je jednoduchým řešením, ve kterém je vzorek položen na vyfrézované ploše základny a přiražen k vystouplé hraně pomocí utahovacího šroubu a čtvercové podložky. Šroub je uložen pod takovým úhlem, aby osa šroubu směřovala ven z vany a bylo ho možné utahovat pomocí imbusového klíče. V základně je ještě vyrobena díra se závitem, která pomocí šroubu upevňuje UV k vaně.



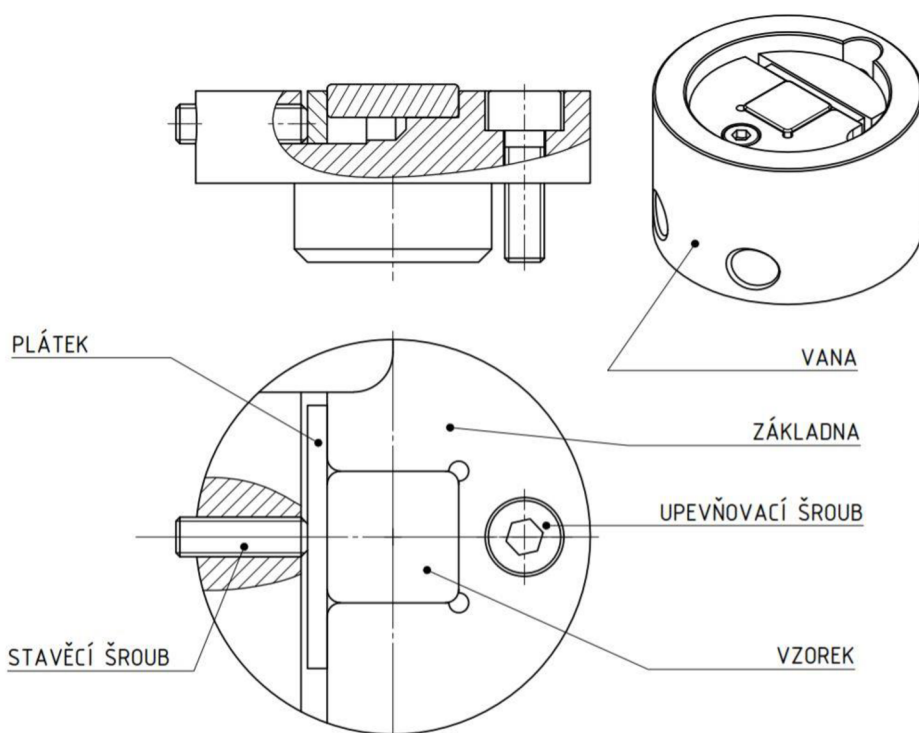
Obr. 4-7 UV I; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

Výhodou tohoto řešení je snadné upnutí vzorku a také jednoduchost celého konceptu. UV je samostatným prvkem, který se k vaně připevní pomocí šroubu a proto je možné jej vždy vyměnit.

Nevýhodou se však stává tvar konceptu. Přibližně polovina štětin kartáčku je při posuvu v kontaktu s plochou vzorku, druhá polovina v tomto případě naráží na boční stěnu základny, případně na čtvercovou podložku. To by mohlo mít za následek znehodnocení výsledků experimentu. Další nevýhodou je výška základny, kvůli které musí být hlubší vana, čímž narůstá spotřeba maziva (směs umělých slin a zubní pasty).

## 4.2.2 UV II

Koncepční řešení UV II, které je zobrazeno na obrázku 4-9, je tvořeno kruhovou základnou s vyfrézovaným čtvercovým otvorem pro vložení vzorku a drážkou pro vložení plátka. Kolmo k drážce je vytvořena díra se závitem, ve které je zašroubován stavěcí šroub. Tento šroub vlivem utahování tlačí na plátek a ten následně tlačí na vzorek. Plátek má funkci rozložení sil na bok vzorku. Kdyby zde plátek nebyl, mohlo by dojít ke zničení vzorku. Spodní část základny je tvořena válcovou plochou, která zapadá do vyfrézovaného otvoru vany. Správnou polohu a připevnění UV k vaně zajišťuje upevňovací šroub. Kruhový tvar UV II je navržen pro kruhovou vanu.



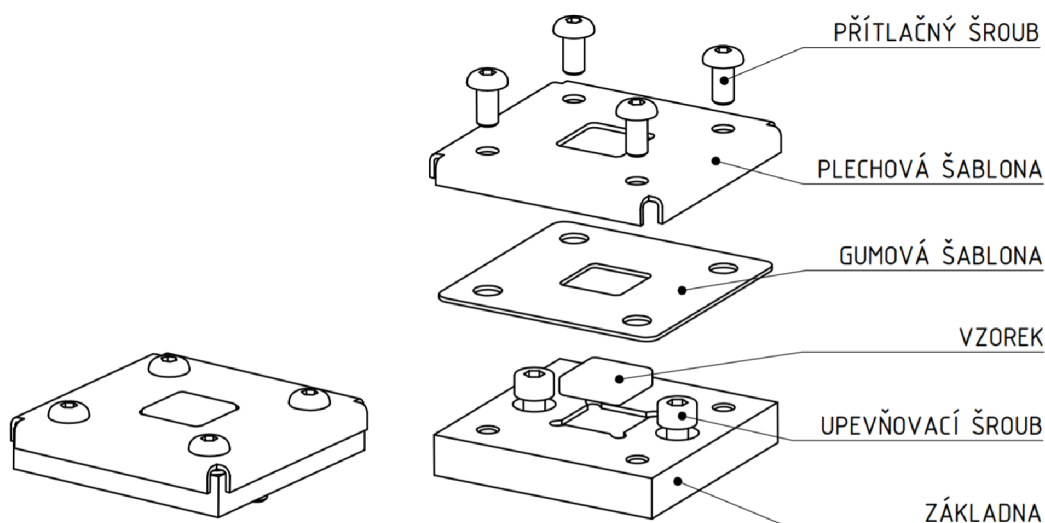
Obr. 4-8 UV II; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

Předností UV II jsou převážně vodorovné plochy okolo vzorku, díky kterým nedochází k takovým rázům štětín, jako v případě UV I. Tvar základny je navržen tak, aby přesně pasoval do kruhové vany a snížila se tak spotřeba maziva.

Velkým nedostatkem je upínání vzorku pomocí stavěcího šroubu. Kvůli jeho umístění není možné upnout vzorek, aniž by nebyl odmontován upínač, což má za následek dlouhou dobu přípravy. Dalším problémem, který by mohl nastat, je zasekávání štětín v prostoru mezi plátkem a stěnou drážky, ve které je plátek uložen.

### 4.2.3 UV III

V případě UV III se jedná o experimentální způsob upnutí, který je schematicky zobrazen na obrázku 4-10. Vzorek je vložen do vyfrézovaného čtvercového otvoru (hluboký přibližně jednu třetinu tloušťky vzorku). Následně je přes vzorek navléknuta gumová šablona a na ní položena plechová šablona. Obě šablony jsou poté přimáčknuty k základně pomocí přitlačných šroubů. Gumová šablona se vlivem tlaku začne deformovat a tlačít na boky vzorku. Nakonec je vzorek pevně obepnut gumou a je zabráněno jeho pohybu při experimentu. Aby nedocházelo k velké deformaci plechové šablony, jsou její okraje zahnuty směrem k základně, čímž dochází ke zvětšení tuhosti. UV III je k vaně připevněn pomocí dvou upevňovacích šroubů uložených v základně.



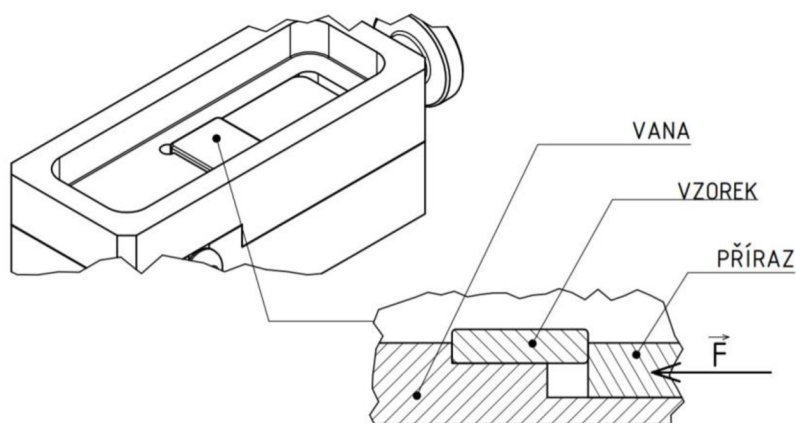
Obr. 4-9 UV III; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

Výhodou tohoto řešení je velmi snadné a bezpečné upnutí a především vodorovná a hladká plocha okolo vzorku. Bohužel kvůli omezeným podmínkám způsobeným pandemií Covid-19 nebyl vytvořen žádný prototyp tohoto upínače a proto se dá jen diskutovat o jeho funkci.



#### 4.2.4 UV IV

Posledním konceptem je UV IV, který je navržen jako součást vany a je schematicky znázorněn na obrázku 4-11. Ve vaně je vyfrézovaná podlouhlá obdélníková drážka, připomínající drážku pro pero. V této drážce je uložena součást zvaná příraz. Na okraji drážky (ve středu dna vany) je vyfrézovaný čtvercový otvor, do kterého se vkládá vzorek. Ten je následně sevřen mezi přírazem a stěnou otvoru vlivem zatěžující síly, vytvořené šroubem, případně pružinou.



Obr. 4-10 UV IV; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

Velkou výhodou je jednoduchost konceptu. K upevnění je zapotřebí jedné nenormalizované součásti (přírazu), vyfrézované drážky a šroubu. Díky tomu, že je vzorek přímo upnut ve vaně, je zapotřebí velmi málo maziva. Kvůli rovným plochám vany a přírazu nedochází k rázům štětín o nežádoucí hrany. Upnutí a výměna vzorku je velmi jednoduchá, avšak utahování šroubu musí být prováděno s opatrností.

Po zvážení všech variant bylo zvoleno pro upínání vzorku koncepční řešení UV IV, především kvůli jednoduchosti a nízkým nákladům na výrobu. Toto řešení bude součástí všech koncepčních řešení vany v další kapitole.

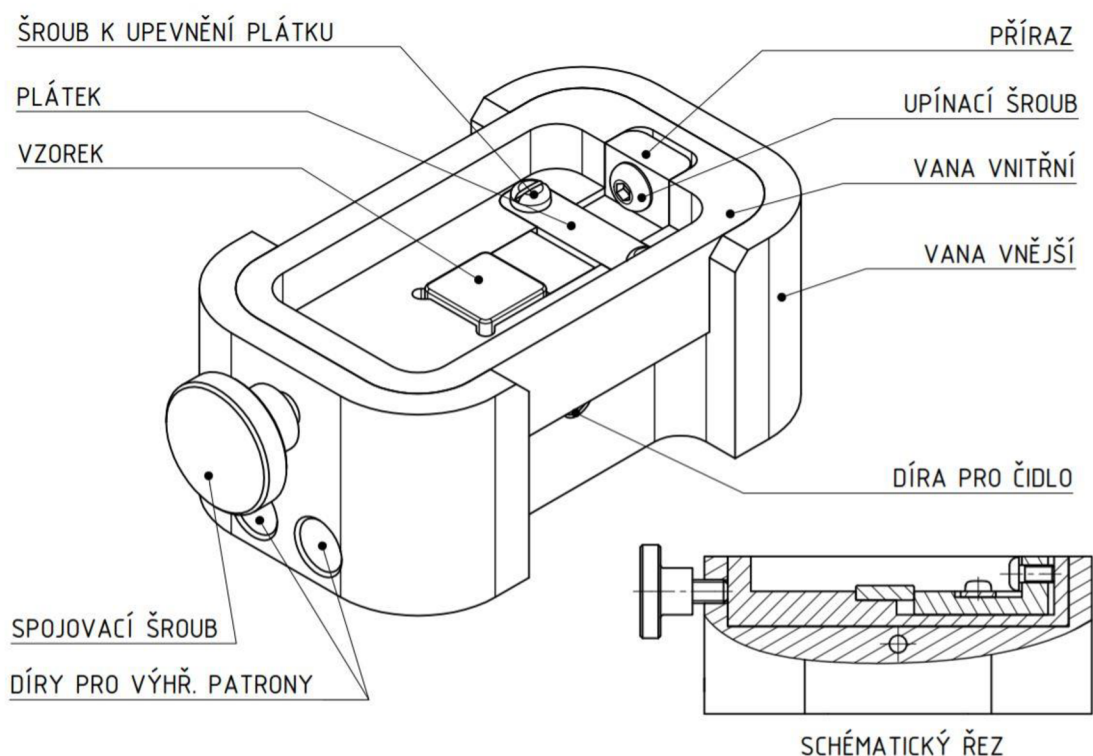
## 4.3 Koncepty vany

Společným prvkem těchto konceptů jsou otvory pro topné patrony, otvor pro čidlo a rozdělení van na vanu vnitřní a vanu vnější, pro usnadnění manipulace s vanou.

### 4.3.1 Vana I

Prvním konceptem, zobrazeným na obrázku 4-12, je Vana I, kde hlavními částmi je vana vnitřní a vnější. Vana vnitřní má obdélníkový tvar, v jehož středu se upíná vzorek. Upnutí vzorku je zajištěno přírazem o tvaru písmene „L“, který je připevněn k vaně pomocí plátku a dvou šroubů. Síla působící na příraz je vytvořena upínacím šroubem, umístěným v díře se závitem v kratším rameni přírazu. Šroub je zde umístěn tak, aby hlavice směřovala do vnitřního prostoru vany. Tento šroub je opřen o stěnu vnitřní vany a při jeho otáčení (utahování), dochází k pohybu přírazu směrem ke vzorku.

Vana vnější je navržena tak, aby v ní byla zapašována vana vnitřní a následně sevřena spojovacím šroubem. Spojovací šroub je normalizovaný šroub s rýhovanou hlavou pro snadné utahování rukou. V dolní části vany se nachází dvě díry pro vyhřívací patrony a díra pro čidlo. Tvar vnější vany je navržen tak, aby hmotnost byla co nejmenší.



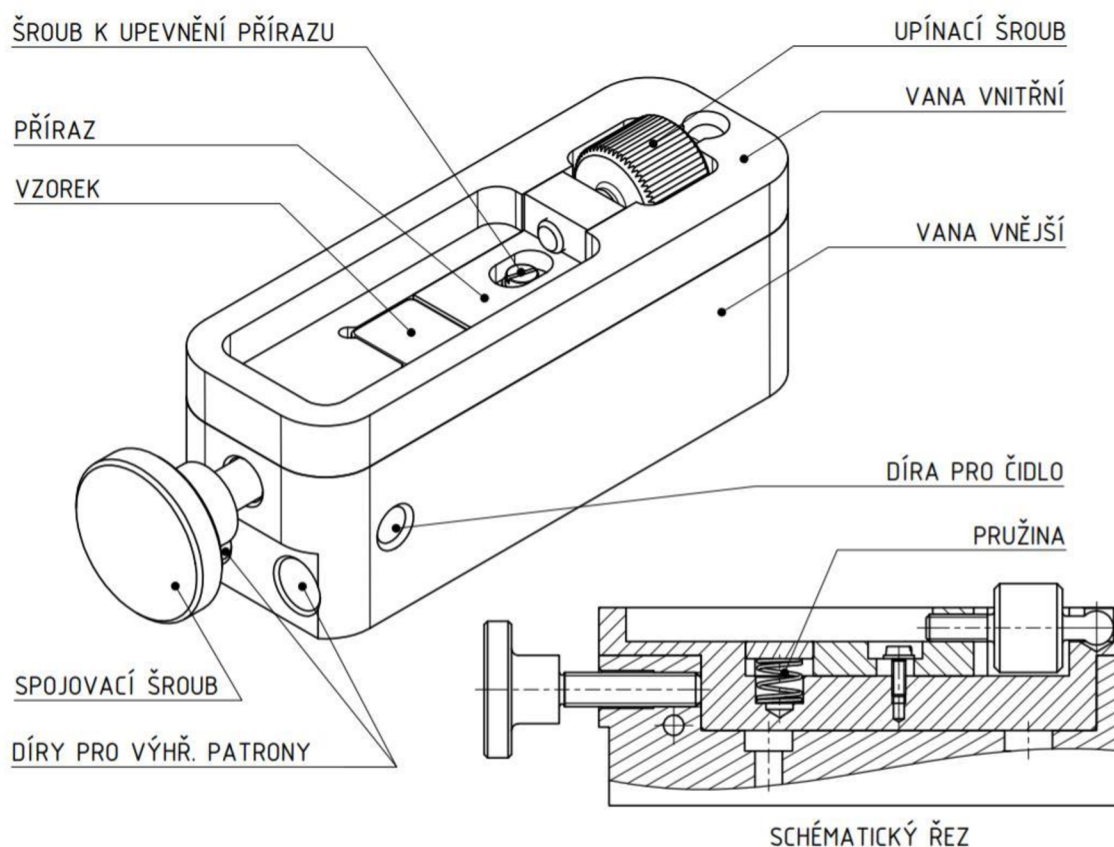
Obr. 4-11 Vana I; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.



### 4.3.2 Vana II

V případě tohoto koncepčního řešení, které je zobrazeno na obrázku 4-13, je vnitřní vana podlouhlá. Je to kvůli speciálnímu upínacímu šroubu, který je navržen pro snadné upínání vzorku jedním prstem. Tento šroub je tvořen z jedné strany závitem a z druhé kulovou plochou. Jeho střed tvoří široký válec, který je na povrchu rýhován kvůli lepšímu kontaktu (prst - šroub). Upínací šroub pohybuje přírazem stejně jako v případě Vany I. Příraz je připevněn k vnitřní vaně pomocí šroubu. Dále je pod vzorkem vyvrtaná díra, ve které je uložena pružina. Díky ní lze přesně nastavit vzorek tak, aby jeho plocha byla totožná s plochou dna vany.

Vana vnější je zde řešena stejně jako v konceptu Vana I, s rozdílem že do vany vnější se vkládá jen spodní část vany vnitřní, nikoliv celá. Je to kvůli úspoře materiálu a výrobních nákladů. Díky sjednoceným tvarům van není zapotřebí další odlehčení.

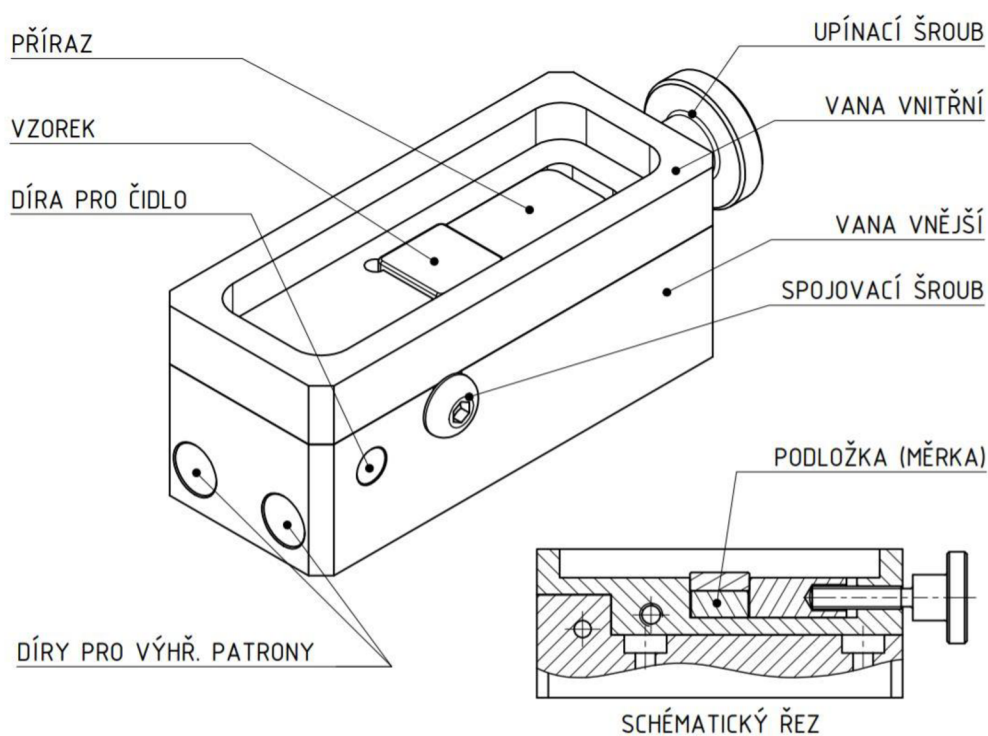


Obr. 4-12 Vana II; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

### 4.3.3 Vana III

Při návrhu tohoto řešení byl kladen velký důraz na jednoduchost a minimalismus celého konceptu. Na obrázku 4-14 je vidět, že vnitřní vanu tvoří převážně pracovní plocha, její ohraničení a příraz, kterým je manipulováno pomocí upínacího šroubu. Jako upínací šroub je použit šroub s rýhovanou hlavou a do vany je přiveden z vnějšku. Aby nedocházelo k úniku maziva v prostorech mezi šroubem a dírou se závitem, je šroub omotan instalatérskou páskou. Výšku a polohu vzorku lze měnit pomocí několika podložek (měrek) umístěných pod ním.

Tvar vany vnější je zde navrhnut stejně jako v případě Vany II. Avšak spojení vany vnitřní s vnější je jiné. Ke spojení součástí jsou využity dva spojovací šrouby, které jsou rozmístěny v drážkách na bocích vany vnější. Tyto šrouby jsou následně našroubovány do vany vnitřní a jejich utažením vzniká předepjatý spoj.



Obr. 4-13 Vana III; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí.

#### 4.3.4 Zhodnocení konceptů van

Tato kapitola se zabývá porovnáváním jednotlivých konceptů vany, jejich výhodami (nevýhodami) a zdůvodněním vybraného konceptu pro následnou výrobu.

Vana I je jednoduchým a nenákladným řešením. Jeho velkou předností, na rozdíl od dalších řešení, je poloha umístění čidla. To se nachází velmi blízko vzorku a zároveň patron. Díky tomu je možné velmi rychle a efektivně seřídit teplotní podmínky experimentu. Bohužel kvůli plátku, umístěném na dně vany v blízkosti vzorku, hrozí riziko zadrhávání štětín kartáčku při jeho pohybu. To by mohlo mít za následek nežádoucí výchylky při měření součinitele tření.

Vana II je elegantním řešením, co se týče způsobu upínání vzorku, ke kterému není zapotřebí žádný nástroj. Prostor vany je menší než v případě vany I, díky čemuž dochází k menší spotřebě maziva. Na druhou stranu se jedná o relativně drahé řešení, kvůli využití nenormalizovaného upínacího šroubu a stejně jako v případě vany I zde může docházet k zadrhávání štětín v místě upevnění přírazu k vaně.

Vana III je v porovnání s předchozími koncepty nejlehčí a konstrukčně nejjednodušší. Jelikož upínací šroub tlačí do těžiště přírazu, není zde zapotřebí upevňovacího šroubu, díky čemuž nedochází k rázům štětín o nežádoucí plochy. Jedinou nevýhodou je zde riziko vytečení maziva avšak řešením je omotání upínacího šroubu teflonovou páskou.

Na základě shrnutí výhod a nevýhod jednotlivých konceptů van byl pro konstrukční řešení a následnou výrobu zvolen koncept Vana I.

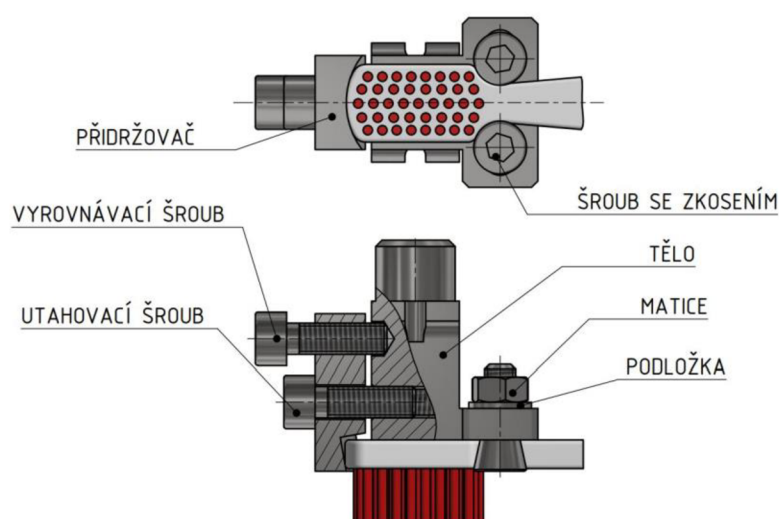
## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

### 5.1 Upínač kartáčku

Upínač kartáčku byl navržen tak, aby se kartáček upínal za jeho hlavici a to bez ohledu na její tvar a velikost. Způsob, jaký byl zde použit pro upínání hlavice se využívá i při samotné výrobě zubních kartáčků, přesněji ve výrobním procesu, kdy se do hlavice kartáčku aplikují štětiny, viz kapitola 2.2.8. Aby bylo možné tento princip upínání použít i u našeho simulátoru, bylo nutné navrhnout upínač skládající se ze součástí, které jsou zobrazeny na obrázku 5-1 a popsány v tabulce 5-1.

Tabulka 5-1 Součásti upínače kartáčku a jejich popis

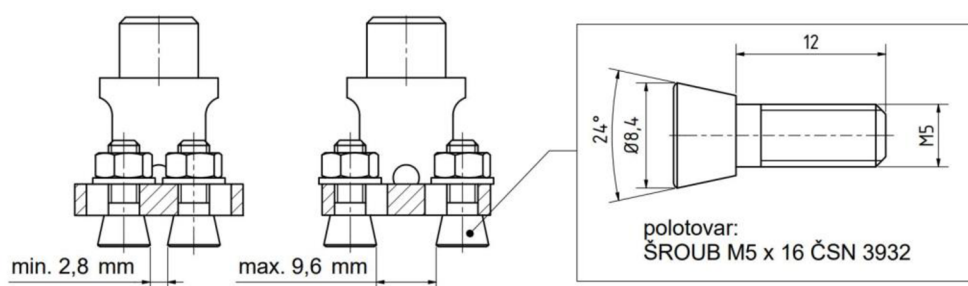
Název součásti	Počet kusů	Popis a funkce
Tělo	1	Nosná část a spojnice mezi kartáčkem a simulátorem.
Šrouby se zkosením	2	Upínací prvky, mezi nimiž se ukládá krček kartáčku.
Podložky	2	Bezpečnostní prvky, sloužící ke správné aretaci šroubů.
Matice	2	Aretační prvky, zajišťující polohu šroubů se zkosením.
Přidržovač	1	Upínací prvek, do kterého zapadá přední část hlavice.
Utahovací šroub	1	Upínací člen, který tlačí přidržovač k tělu.
Vyrovnávací šroub	1	Vyrovnávací člen, zajišťuje svislou polohu přidržovače.



Obr. 5-1 Upínač kartáčku; barevné schéma

### 5.1.1 Tělo upínače

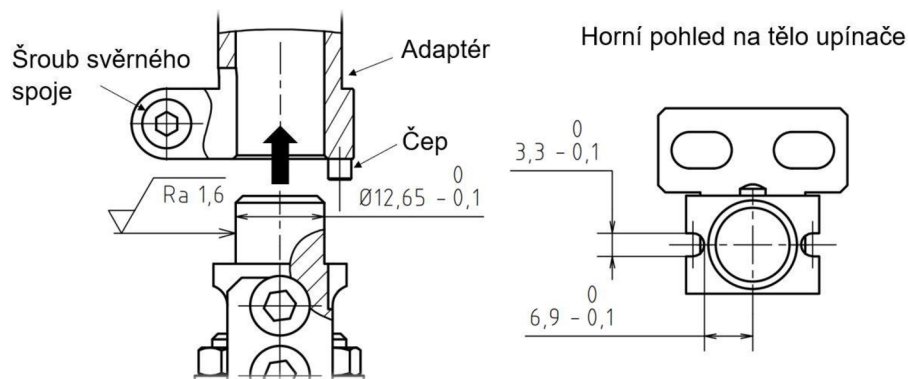
Tělo upínače zde tvoří hlavní spojnicí mezi kartáčkem a sondou simulátoru Bruker. Kartáček se přikládá na spodní plochu těla tak, aby krček kartáčku zapadl mezi hlavy dvou speciálně upravených šroubů. Jedná se o šrouby s válcovou hlavou dle normy ČSN 3932, kterým byla zkosená spodní hrana hlavy pod úhlem 24°. Tyto šrouby se nacházejí v drážkách, které jsou vyfrézovány do ploché části na spodku těla a jsou dále zaaretovány maticemi. Tvar těchto drážek je navržen tak, aby bylo možné přesně nastavit rozteč šroubů a bylo tak možné upnout všechny typy manuálních zubních kartáčků, viz obrázek 5-2. Maximální vzdálenost hlav šroubů byla navržena na 9,6 mm, ačkoli žádný z komerčně prodávaných kartáčků nemá takto široký krček, tento rozměr byl naddimenzován pro případ, že by byly využity jiné šrouby. Minimální vzdálenost byla navržena se stejným přístupem a byla stanovena na 2,8 mm.



Obr. 5-2 Minimální a maximální vzdálenost šroubů

Další důležitou částí je válcové zakončení, umístěné v horní části těla. Touto částí se pomocí svěrného spoje připevňuje upínač kartáčku k adaptéru simulátoru, viz obrázek 5-3. Aby byl zaručen správný kontakt válcové plochy se svírajícími se stěnami otvoru adaptéru, byla zvolena drsnost povrchu na Ra 1,6.

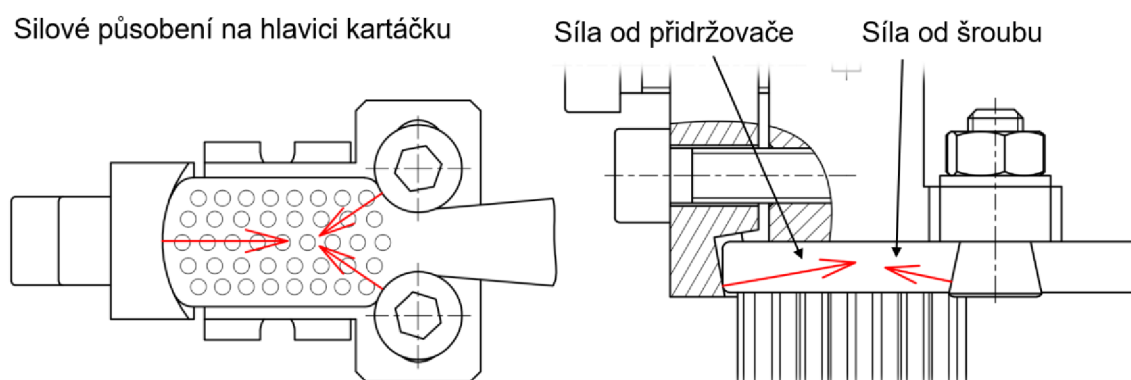
Pod válcovým zakončením se nacházejí dvě drážky, které pomocí čepu v adaptéru zajišťují správnou polohu upínače. Na upínači se nacházejí tyto drážky dvě, aby bylo možné upínač používat v dvou směrech. Původně zde měli být drážky 4 po 90°, avšak senzor, který je v simulátoru aplikován, dokáže zaznamenávat silové účinky jen ve dvou směrech tzv. „Tam a zpět“.



Obr. 5-3 Uložení upínače v adaptéru simulátoru Bruker

## 5.1.2 Přidržovač

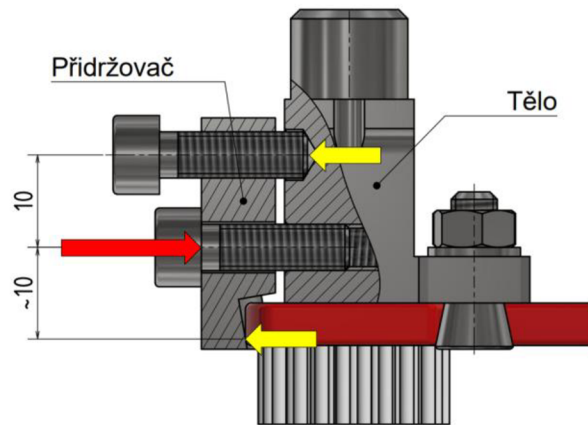
Přidržovač je součást, jejíž funkcí je zajištění polohy kartáčku mezi válcovou plochou drážky vně součásti a dvou šroubů se zkosenou hlavou. Aby přidržovač společně se šrouby se zkosením svírali hlavici kartáčku a zároveň ji tlačili směrem ke spodní ploše těla upínače, je drážka do přidržovače vyfrézována pod úhlem  $10^\circ$ . Silové působení nám zaručí, že při experimentu nedojde k uvolnění kartáčku z upínače a zároveň se snáz zajišťuje kolmost štětin vůči vzorku, viz obrázek 5-4.



Obr. 5-4 Silové působení na hlavici kartáčku

Součástí návrhu přidržovače bylo i jeho samotné spojení s tělem. To je zde řešeno pomocí dvou šroubů, kde jeden má funkci utahovací a druhý vyrovnávací. Jak je vidět na obrázku 5-5 na další straně. Uprostřed přidržovače se nachází průchozí otvor, jímž prochází utahovací šroub. Ten je dále zašroubován do otvoru se závitem uvnitř těla a jeho utahováním posouváme přidržovač směrem k tělu a zubnímu kartáčku. Druhý, vyrovnávací šroub je zašroubován v otvoru se závitem v horní části přidržovače a prochází až do vyvrtaného otvoru uvnitř těla. Díky tomuto šroubu dochází k rovnoměrnému zatížení na přidržovači a nedochází tak k momentovému namáhání utahovacího šroubu. Dále také plní funkci zajišťování svislé polohy přidržovače a tak je možné upínat všechny typy kartáčku bez ohledu na jejich délku hlavice. Aby k upínači nebylo zapotřebí velké množství nástrojů, byly šrouby pro utahování a vyrovnávání zvoleny M5 x 16 ČSN 3932, což jsou stejné šrouby ze kterých byly vyrobeny šrouby se zkosením.





Obr. 5-5 Rozložení sil na přidržovači; červená šipka znázorňuje utahovací sílu; žluté šipky znázorňují reakční síly působící na přidržovač

### 5.1.3 Materiál a drsnost povrchů

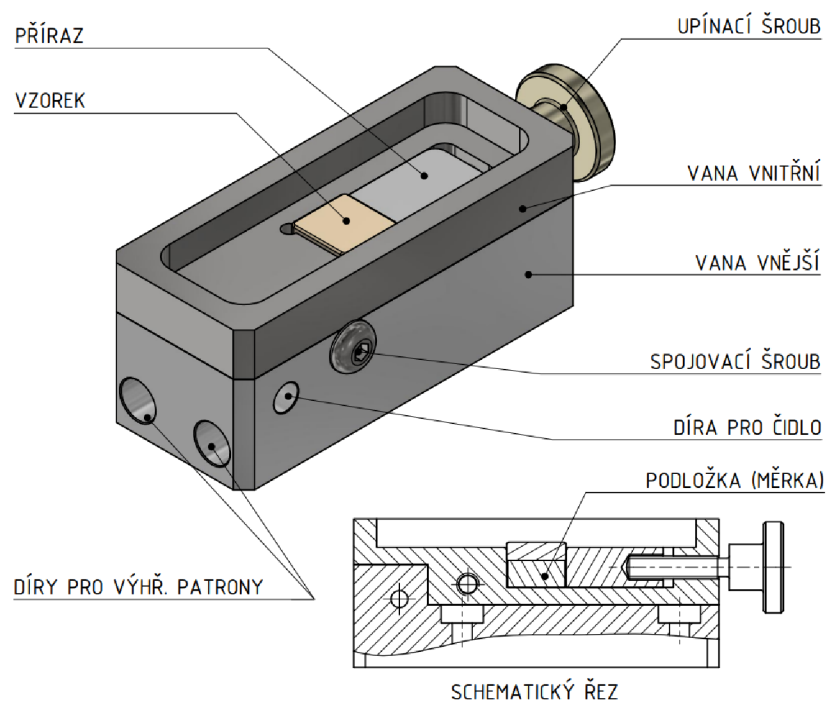
Pro výrobu upínače byl zvolen materiál EN 1.43.01. Jedná se o korozi-vzdornou ocel vhodnou do vlhkého a nesterilního prostředí, což přesně odpovídá podmínkám, ve kterém se upínač bude pohybovat. Použité šrouby jsou též z korozi-vzdorných materiálů.

Co se týče drsností, povrchy, které jsou ve styku s kartáčkem jsou požadovány na Ra 1,6. Ostatní plochy, kromě válcového zakončení, byly stanoveny na Ra 3,2. Jelikož je upínač vystaven častému znečištění, použití horší jakosti povrchu by mohlo mít za následek usazování nečistot v nerovnostech povrchu a vznik koroze v těchto místech.

## 5.2 Vana

Dalším součástí modulu simulátoru je vana, do které se ukládá vzorek zubní výplně. Ten se vkládá do vyfrézované drážky na dně vany, kde je následně sevřen pomocí přírazu (součásti vany). Do této vany se dále aplikují topné patrony, které zajišťují vyhřátí vzorku na požadovanou teplotu. Vana se skládá ze 3 nenormalizovaných dílů, vany vnější, vany vnitřní a přírazu. Rozdělení vany na vnější a vnitřní slouží k usnadnění montáže vany na upínací desku recipročního modulu a urychlení případné výměny vzorků při experimentech. Dalšími součástmi jsou dva šrouby s půlkulatou hlavou a šroub s rýhovanou hlavou. Přesné umístění těchto dílů je schematicky zobrazeno na obrázku 5-5 a stručně popsáno v tabulce 5-2 na další straně.

Název součásti	Počet kusů	Popis a funkce
Vana vnější	1	Prvek, připojený k driveru, zajišťující výhřev vzorku.
Vana vnitřní	1	Pracovní část pro uložení vzorku, zajišťující mazání.
Příraz	1	Upínací prvek, svírající vzorek v drážce.
Podložka	1	Seřizovací člen, zajišťující správné uložení vzorku.
Upínací šroub	1	Šroub s rýhovanou hlavou, zatěžující příraz.
Spojovací šroub	2	Šrouby M4, spojující vanu vnitřní s vanou vnější.

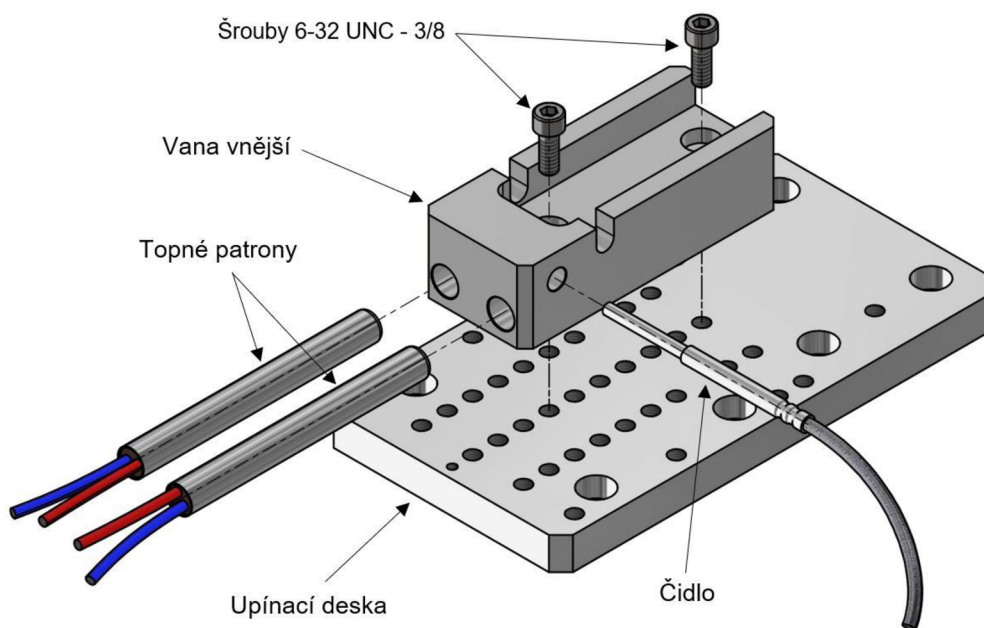


Obr. 5-6 Vana; barevné schéma

### 5.2.1 Vana vnější

Vana vnější je součást, která slouží k zajištění výhřevu vzorku na danou teplotu a zároveň je celá sestava přes tuto součást spojena s upínací deskou recipročního modulu, viz obrázek 5-7 na další straně. Ke spojení vany vnější s upínací deskou slouží 2 šrouby s válcovou hlavou. K vyhřívání vzorku je využito topné zařízení, jehož součástí jsou dvě topné patrony a čidlo. Tyto patrony se vkládají do vystružených otvorů v dolní části vany. Čidlo se vkládá do otvoru umístěném těsně nad otvory pro patrony, díky čemuž je zaručené rychlé nastavení teploty.

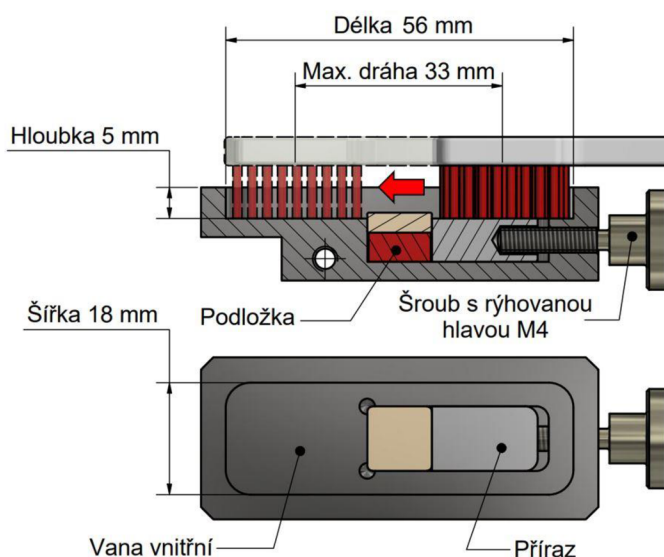




Obr. 5-7 Vana vnější; Schéma montáže jednotlivých prvků.

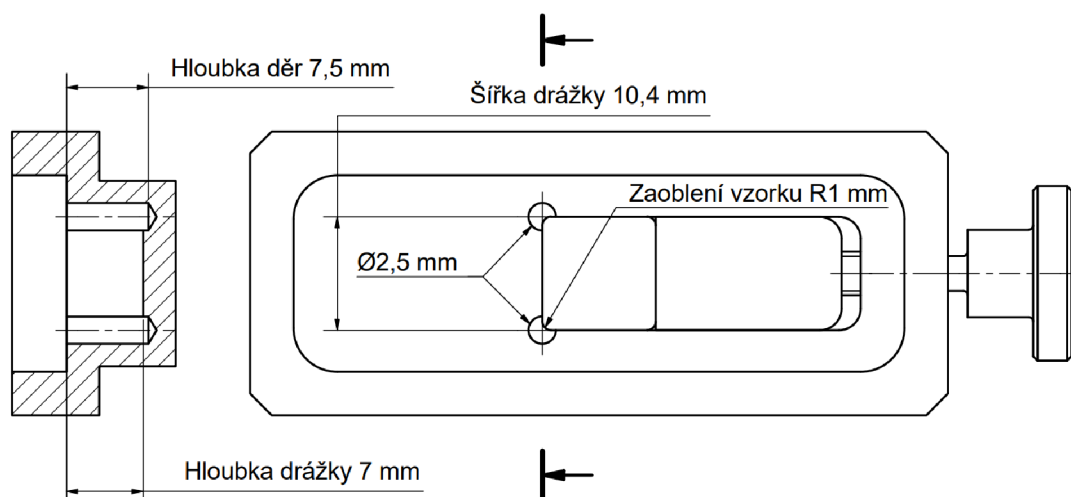
## 5.2.2 Vana vnitřní

Vana vnitřní je nejdůležitější součástí sestavy vany. V této součásti se nachází pracovní prostor, který je při experimentu napuštěn roztokem umělých slin a zubní pasty. Dále je zde pomocí dalších tří součástí, přírazu, podložky a šroubu s rýhovanou hlavou, upnut vzorek. Samotný prostor vany byl navržen tak, aby kartáček při pohybu po vzorku mohl kompletně vyjet z jeho povrchu v obou směrech pohybu. Zároveň byly rozměry tohoto prostoru postupně zmenšovány, aby nebylo zapotřebí velkého množství roztoku umělých slin a zubní pasty. Rozměry tohoto prostoru a maximální dráha, kterou může kartáček vykonat jsou zobrazeny na obrázku 5-8.



Obr. 5-8 Vana vnitřní; Rozměry pracovního prostoru.

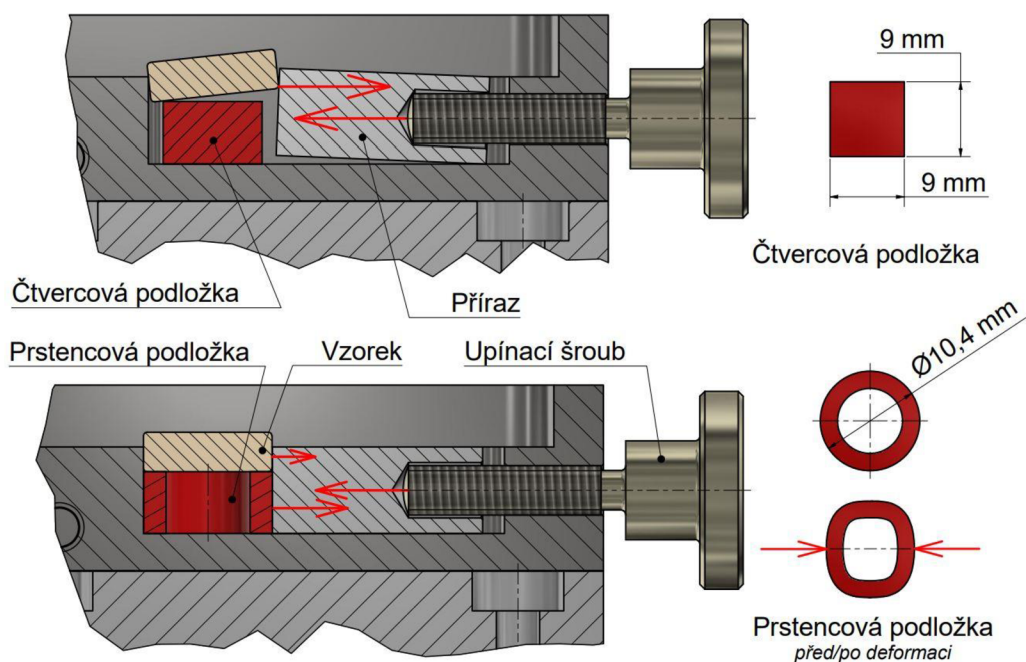
Důležitou schopností vany je upínání vzorku. K tomu zde slouží drážka, ve které se nachází součást zvaná příraz. Mezi přírazem a stěnou drážky je síla, vytvořenou šroubem, sevřen vzorek a tato drážka je navržena tak, aby bylo možné upnout vzorky i s nepatrnými odchylkami, viz obr. 5-9. Ačkoli jsou vzorky vyráběny s rozměry (10x10x3) mm, šířka drážky byla pro jistotu stanovena na 10,4 mm, aby bylo možné pokaždé upnout vzorek. Krátké hrany vzorků jsou zaoblené. Rádus zaoblení je často menší než 2 mm a proto jsou hrany drážky v místě uložení vzorku nejprve vyvrtány a až poté vyfrézovány. Aby nedocházelo k velkým rázům štětin o stěny těchto vývrtů, byl jejich průměr stanoven na pouhých 2,5 mm.



Obr. 5-9 Rozměry vývrtů v rozích drážky pro příraz

Samotný příraz byl navržen tak, aby přesně vyplňoval prostor drážky vně vany vnější. Součástí přírazu je vyvrtaný otvor, ve kterém působí šroub s rýhovanou hlavou. Tento otvor slouží k tomu, aby síla od šroubu působila co nejbliž k těžišti součásti. Částečně také zabraňuje přírazu vypadnout z drážky při manipulaci se sestavou.

Co se týče podložek, původně byly navrženy jako malé čtvercové destičky o rozměrech (9x9) mm a výšce od 3 do 6 mm, vyrobené pomocí metody 3D tisk. Po vyrobení prototypu sestavy se však ukázalo, že při dotahování upínacího šroubu dochází k nadzvedávání přední části přírazu, viz obrázek 5-10 na další straně. Toto nadzvedávání bylo způsobené špatným silovým působením na svislou plochu přírazu. Tento problém byl nakonec vyřešen pomocí prstencových (kruhových) podložek, vyrobených stejným způsobem. Vnější průměr těchto podložek je roven šířce drážky, ve které je umístěn příraz a vzorek, tedy 10,4 mm. Díky tomu, že podložka má větší průměr než je délka hrany vzorku, dochází vlivem utahování šroubu k deformaci podložky a k silovému zatížení přírazu v místě kontaktu. Ve chvíli, kdy je vzorek pevně upnut, působí reakční síla od vzorku na horní část přírazu a od podložky na dolní část přírazu. Po otestování tohoto principu na prototypu už nedocházelo k nadzvedávání přírazu.

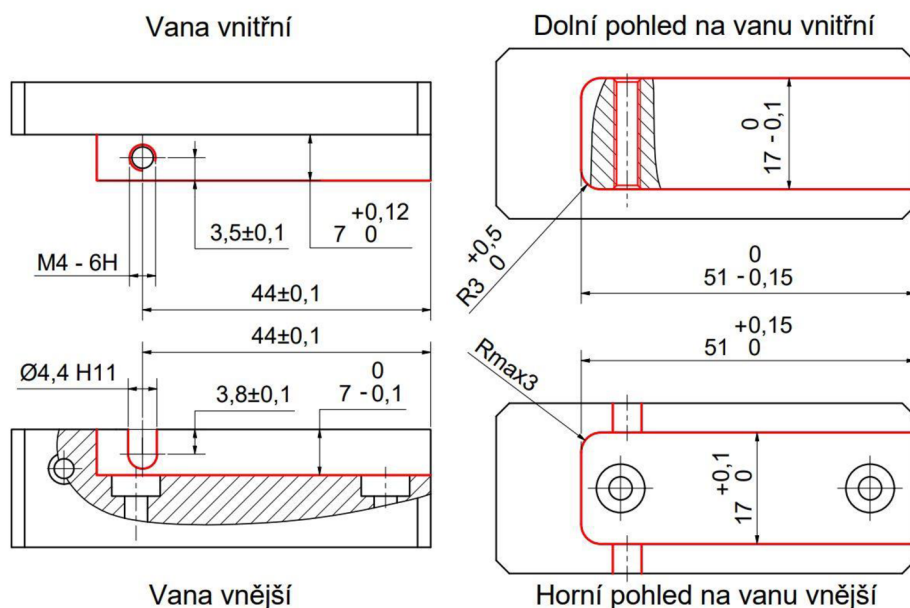


Obr. 5-10 Schématické zobrazení problému s nadzvedáváním přírazu a jeho řešení; Červené šipky ve schématu znázorňují reakční síly působící na příraz.

### 5.2.3 Spojení van

Vana vnitřní a vnější byly navrženy tak, aby do sebe navzájem přesně pasovaly, díky čemuž byly rozměry a hmotnost celé sestavy sníženy na minimum. Jak lze vidět na obrázku 5-11, ve vaně vnější je vyfrézovaná drážka, do které zapadá protikus vany vnitřní. Hrany těchto tvarů jsou zvýrazněny červeně. Ve vaně vnitřní se dále nachází průchozí otvor se závitem. Ve stejné rovině se ve vaně vnější nacházejí dvě malé drážky. Po kompletaci van se do těchto drážek a následně do otvoru se závitem zašroubují šrouby s půlkulatou hlavou M4. Dotážením těchto šroubů vzniká na obou stranách vany předpjatý spoj, který zaručí pevné spojení van i v průběhu experimentu.

Rozměrové tolerance byly zvoleny tak, aby po výrobě byla zaručena správná montáž sestavy vany. Rozměry drážky ve vaně vnější byly tolerovány do plusu a protikus naopak do mínusu. Jelikož je funkce vany vnější výhřev vzorku, bylo zapotřebí zaručit kontakt spodní plochy vany vnitřní a plochy na dně drážky vany vnější. Proto byla tolerance hloubky drážky zvolena 0,1 mm do mínusu, a hloubky protikusu 0,1 mm do plusu. Co se týče drážek ve vaně vnější a otvoru se závitem ve vaně vnitřní, rozměry byly tolerovány tak, aby byl stoprocentně zaručený funkční spoj pomocí šroubů s půlkulatou hlavou M4.



Obr. 5-11 Schéma spojení van včetně tolerovaných rozměrů spojovaných součástí; Červeně zvýrazněny hrany spojovaných částí van.

## 5.2.4 Materiál a drsnost povrchů

Stejně jako v případě upínače kartáčku, i zde byla pro výrobu obráběných součástí zvolena korozivzdorná ocel EN 1.43.01. Drsnosti povrchů byly na plochách vně pracovního prostoru a drážky pro příraz stanoveny na Ra 1,6. Stejná drsnost byla zvolena i na dosedacích plochách vnější a vnitřní vany, na všech plochách přírazu a v otvorech pro patrony a pro čidlo. Zbylé plochy jsou požadovány na drsnost povrchu Ra 3,2.

## 5.3 Prototypy a jejich otestování

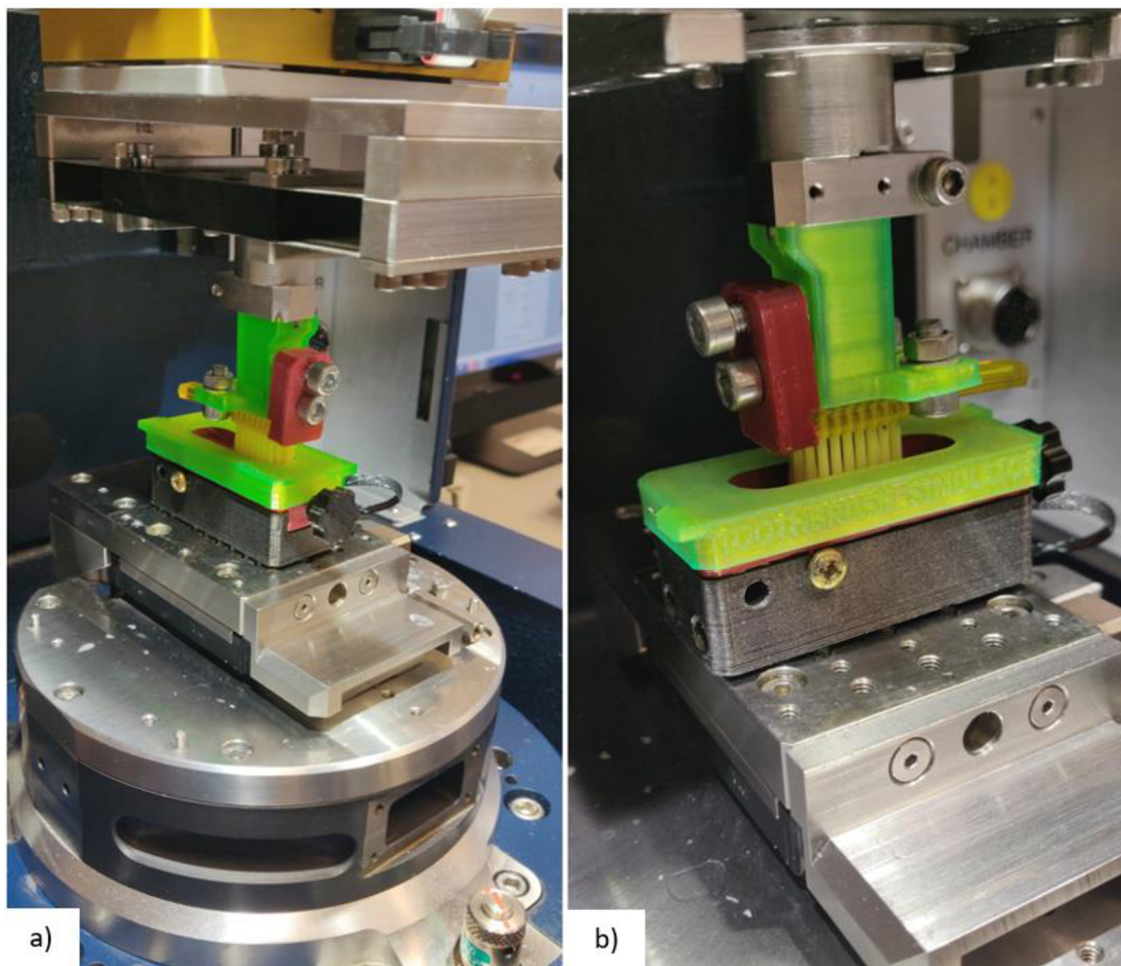
Součástí vývoje upínače kartáčku a vany byla výroba prototypů. Prototypy byly vyráběny pomocí metody 3D tisk na domácí tiskárně Creality Ender 3 Pro. Tyto modely sloužily především k ověření funkčnosti a byly nedílnou součástí při volbě finálních koncepčních řešení. Na obrázku 5-12 lze vidět několik prototypů upínače kartáčku a prototypů van.

Důležitými prototypy byly modely finálních konceptů vany a upínače. Ty byly následně aplikovány do simulátoru Bruker, kde byla ověřena jejich funkčnost. Jak lze pozorovat na obrázku 5-13, upínač kartáčku se od aktuálního provedení mírně liší. Drážka, do které zapadá aretační čep v horní části se nacházela v popředí upínače. Jelikož sonda umístěna v simulátoru dokáže zaznamenávat silové působení jen ve dvou směrech tzv. „Tam a zpět“, bylo nutné tuto drážku o 90 stupňů pootočit. Po zhotovení nového prototypu upínače a ověření funkčnosti byla schválena následující výroba přípravků.





Obr. 5-12 Prototypy upínačů zubních kartáčků a van, vyrobené pomocí metody 3D tisk.



Obr. 5-13 Aplikace prototypů do simulátoru Bruker UMT TriboLab; a) Standartní aplikace modulů; b) Aplikace modulu s použitím pohybu vrchní části simulátoru.

## 5.4 Výroba

Po otestování prototypů a schválení výkresové dokumentace bylo nutné zařídit výrobu dvou upínačů zubního kartáčku a dvou van. Na výrobu byly poptány dvě společnosti - Winston, sídlící v Brně a společnost Stránský a Petržík, sídlící v Bílé Třemešné v Králověhradeckém kraji. Výroba byla nakonec uskutečněna ve společnosti Stránský a Petržík na základě cenové nabídky. Ceny výroby jednotlivých dílů jsou uvedeny v tabulce 5-3. Objednávka byla provedena 27. ledna 2021 a finální produkty byly dodány 5. března téhož roku. Vyrobené součásti lze vidět na obrázku 5-14 a 5-15.

Tabulka 5-3 Cenová nabídka na výrobu přípravků od společnosti Stránský a Petržík.

Název součásti	Množství	Cena za kus bez DPH	Celková cena bez DPH
Vana vnější	2	1 680 CZK	3 360 CZK
Vana vnitřní	2	1 600 CZK	3 200 CZK
Příraz	2	600 CZK	1 200 CZK
Šroub se zkosením	4	30 CZK	120 CZK
Tělo upínače	2	1 900 CZK	3 800 CZK
Přidržovač	2	1 000 CZK	2 000 CZK
<b>Celkové množství</b>	<b>14</b>	<b>Celkem bez DPH</b>	<b>13 680 CZK</b>
		<b>Celkem vč. DPH</b>	<b>16 552,8 CZK</b>



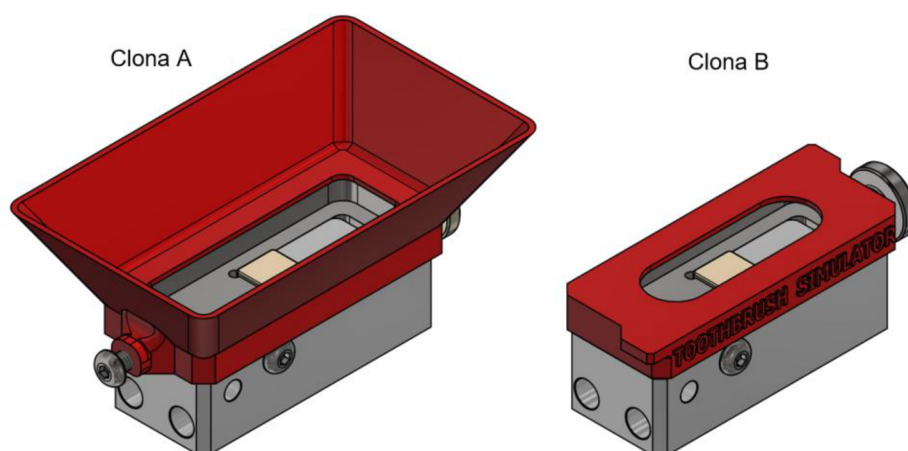
Obr. 5-14 Upínače zubního kartáčku po zhotovení; Vyrobené ve společnosti Stránský a Petržík.



Obr. 5-15 Vany, po zhotovení; Vyrobené ve společnosti Stránský a Petržík.

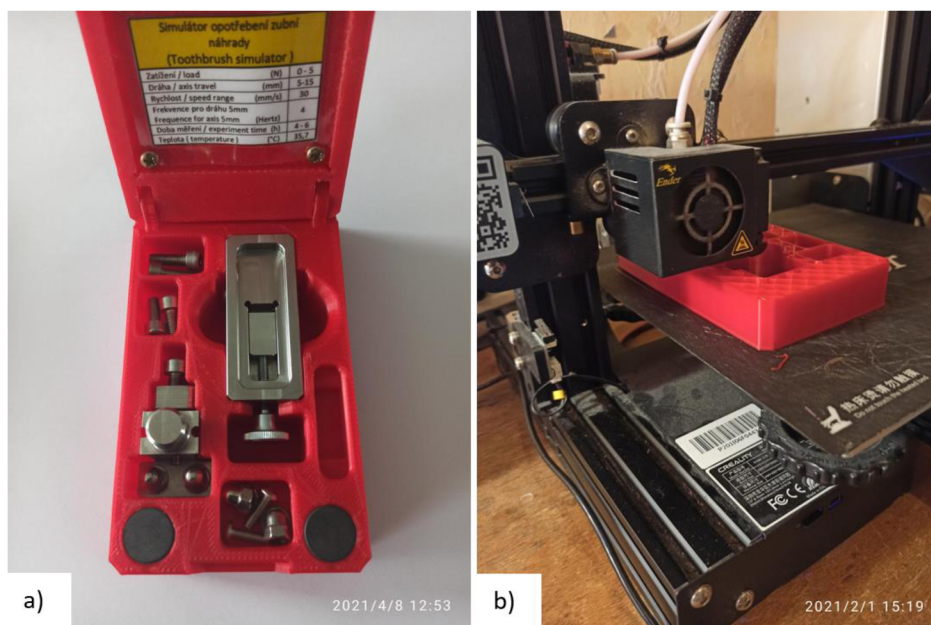
## 5.5 Příslušenství

Dále byla pro upínač kartáčku a vanu vyrobena některá příslušenství. Jedním z nich byly clony, které jsou zobrazeny na obrázku 5-16. Na levé straně můžeme vidět clonu A, která byla navržena pro maximální zamezení rozstříku kapek roztoku umělých slin a zubní pasty v prostoru simulátoru a okolí, a napravo clonu B, která byla navržena jako odlehčená verze clony A. Obě clony se za pomoci malého tlaku nasadí na vanu vnitřní a v případě clony A se ještě zaaretuje šroubem. Dalším návrhem byly dvě pouzdra, do kterých se ukládají přípravky včetně podložek a náhradních šroubů, viz obrázek 5-17. Všechna tyto příslušenství byla vyrobena pomocí metody 3D tisk na tiskárně Ender 3 Pro, z materiálu PLA.



Obr. 5-16 Clona A a B, sloužící k zamezení rozstříku kapek roztoku umělých slin a zubní pasty.





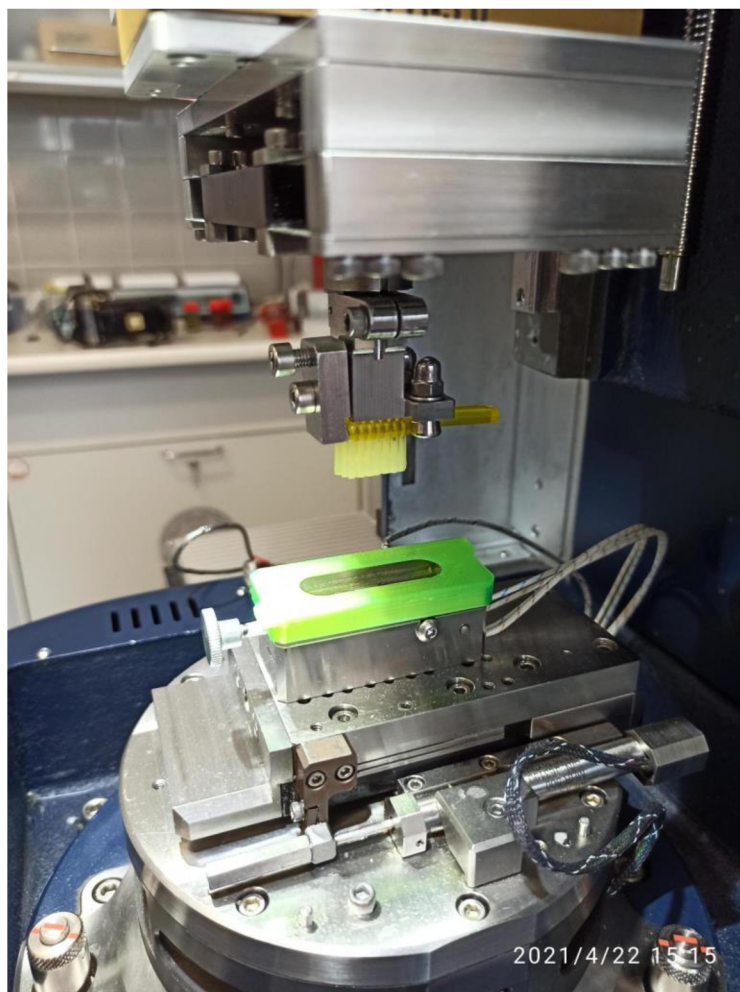
Obr. 5-17 Pouzdro pro upínač zubního kartáčku, vany a náhradních dílů; a) Detail na otevřené pouzdro; b) Výroba pouzdra.

## 5.6 Experiment

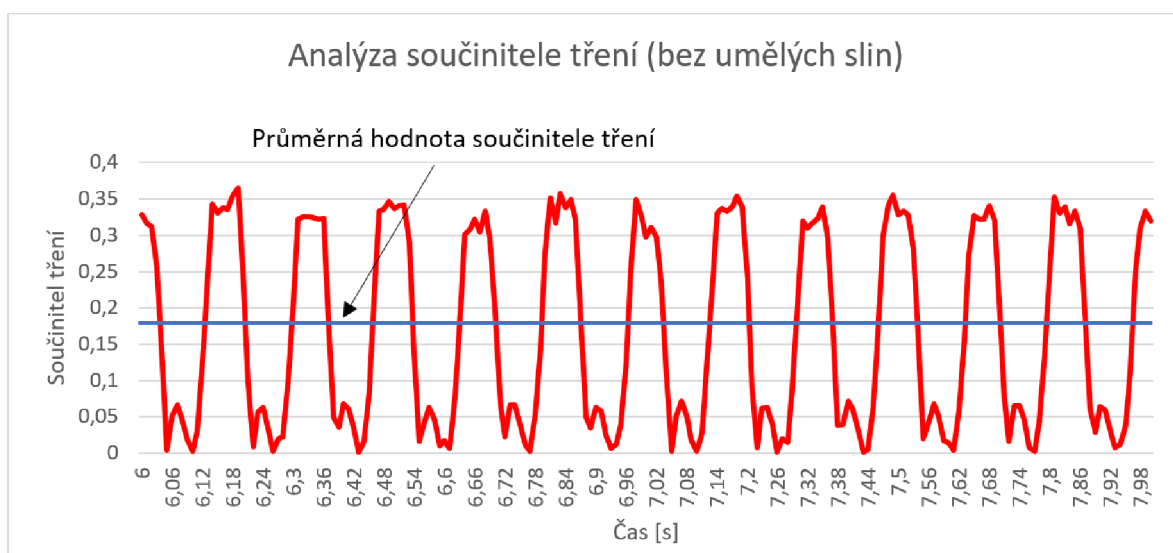
Validační experiment byl proveden 22. dubna 2021 a jeho cílem bylo ověřit funkčnost přípravků a provést analýzu tření při určených podmínkách experimentu. Po montáži a aplikaci upínačů do adaptéru sondy a upevnění obou van na upínací desku byla ověřena správnost rozměrů a funkce uložení. V obou případech byly přípravky funkční a následně bylo provedeno 60 měření, jejichž cílem bylo analyzovat součinitel tření kartáčku od firmy Spokar a vzorku bez přítomnosti a za přítomnosti umělých slin. Tyto experimenty probíhaly při zatížení 2, 3 a 4 N, při frekvenci 3 Hz, dráze 10 mm a teplotě 37 °C. Pomocí těchto měření byla při experimentu naměřena hodnota součinitele tření v přítomnosti umělých slin 0,243 a bez přítomnosti slin 0,259.

Jelikož se jednalo pouze o validační experiment a podmínky experimentu se pravděpodobně budou ještě seřizovat, jsou tyto hodnoty čistě teoretické. Na obrázku 5-18 lze vidět fotografie pořízená z validačního experimentu a na grafu 5-1 průběh součinitele tření v závislosti na čase. Tento graf byl vytvořen na základě jednoho z šedesáti měření a pro názornost zobrazuje pouze hodnoty v časovém rozmezí dvou sekund. Na grafu si lze také všimnout relativně velkých výchylek hodnot součinitele tření. Ty jsou pravděpodobně způsobené změnami směru pohybu kartáčku, při kterých dochází ke vzpěru štětin a tedy k nerovnoměrnému zatížení na povrchu vzorku. Z každého měření byl vypočítán aritmetický průměr hodnot součinitele tření. Konečný součinitel tření s přítomností a absencí umělých slin byl vypočten jako aritmetický průměr již vypočtených průměrů hodnot součinitele tření.





Obr. 5-18 Fotografie simulátoru pro analýzu opotřebení a tření zubů při čištění



Graf 5-1 Analýza součinitele tření bez přítomnosti umělých slin; tento graf obsahuje hodnoty naměřené pouze v daném časovém rozmezí, nikoliv celého měření.

## 6 DISKUZE

Kritická rešerše nám v této práci ukázala, že žádný z dohledaných simulátorů pro analýzu opotřebení a tření zubů při čištění nebyl zcela bezchybný. Často se jednalo o složité nebo nepraktické řešení upínání vzorku a kartáčku, a podmínky, které byly součástí experimentů nezahrnovali důležitý parametr, teplotu. Podmínky experimentu pro náš simulátor tento parametr zahrnují, včetně ostatních odvozených parametrů, jako je zatížení, dráha a frekvence. Jelikož se tato práce zabývá konstrukcí, nikoliv samotným výzkumem, tyto parametry byly určeny předběžně a je možné, že jejich hodnoty se vzhledem k experimentu budou upravovat.

Co se týče samotných návrhů upínačů (držáku), jejich vývoj byl provázen řadou koncepčních návrhů a prototypů, vyrobených pomocí metody 3D tisk. Díky těmto prototypům bylo možné v průběhu vývoje zjišťovat kritická místa, která se následně eliminovala. Nakonec byly tyto prototypy hlavní součástí při volbě vhodných konceptů pro konstrukční řešení. Těmi se staly upínač kartáčku UK V a Vana III s variantou upínání vzorku UV IV, viz kapitola 4.

Konstrukční řešení vybraných konceptů bylo prováděno s ohledem na nízkou hmotnost, malé rozměry a především na nízkou cenu výroby. Ačkoli se na první pohled může zdát, že tvar upínače kartáčku je složitý, byl tento tvar navržen tak, aby počet obráběcích operací při výrobě byl co nejnižší. V upínači je možné aplikovat všechny typy zubních kartáčku, což bylo prokázáno testováním kartáčků od firmy Curaprox s obdélníkovým tvarem hlavice, Tepe s kopinatým tvarem hlavice a Oral-B s elipsoidním tvarem hlavice.

V případě vany (upínače vzorku zubní výplně), byla konstrukce zaměřena na jednoduchou manipulaci a nízkou hmotnost. Vana je rozdělena na dvě hlavní části, vanu vnitřní a vanu vnější. Toto rozdělení slouží k usnadnění montáže vany na upínací desku recipročního modulu a zamezení možného rozlití mazací kapaliny uvnitř simulátoru při demontáži. Vanu by bylo možné zkonstruovat jednodílnou, díky čemuž snížíme hmotnost, ale manipulace se vzorkem a samotná demontáž se stává nepraktická. Součástí sestavy vany jsou dále podložky, kterými se zajišťuje poloha vzorku vůči dna vany vnější. Podložky je možné nahradit kouskem pryže, ale to by mohlo mít za následek problém s nadzvedáváním přírazu, stejně jako v případě použití čtvercových podložek.

Po dokončení konstrukčního řešení, výrobě finálních prototypů a jejich otestování, byla vytvořena výkresová dokumentace. Ta byla následně zkontrolována a zaslána do výroby do společnosti Stránský a Petržík na základě nejlepší cenové nabídky. Po vyrobení součástí pro dvě sestavy upínače kartáčku a dvě sestavy van byla provedena montáž, která potvrdila správnost výkresů. Nakonec byl s pomocí Ing. Pavla Čípka realizován validační experiment, který ověřil funkčnost přípravků (upínačů) a byly analyzovány první data součinitele tření. Nyní jsou přípravky připravené pro nadcházející výzkum.

## 7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byla konstrukce modulu pro simulátor Bruker UMT TriboLab. Tento modul se skládá ze dvou přípravků, upínače zubního kartáčku a vany. V této práci byla provedena kritická rešerše, ze které vycházely podmínky experimentu, a byla nedílnou součástí při návrhu modulu. Práce také obsahuje několik koncepčních řešení, které byly pomocí metody 3D tisk vyrobeny, otestovány a na základě toho, zvoleny vyhovující koncepty pro tvorbu konstrukčního řešení. Součástí konstrukčního řešení byl kompletní návrh přípravků, tvorba výkresové dokumentace a zajištění výroby. Vyrobené přípravky byly nejprve smontovány a následně využity v experimentu, při kterém bylo cílem ověření funkčnosti modulu, vyladění podmínek experimentu a analýza součinitele tření. Tento experiment dokázal, že jsou přípravky plně funkční, a proto lze hlavní a dílčí cíle považovat za splněné. Nyní tento modul společně s tribometrem Bruker bude součástí několika výzkumných úkolů, např. objasnit, zda je tvrdost štětin kartáčku rozhodující při opotřebení zubů při jejich čištění, nebo zda abrazivní částice obsažené v zubních pastách mohou způsobit vážné poškození zubní skloviny či zubní výplně. V příloze této práce naleznete výkresy sestav upínače kartáčku, vany a výkresy jednotlivých součástí.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HOLÍK, P., Y. MOROZOVA, R. ČTVRTLÍK a J. TOMAŠTÍK. Opotřebenění dentálních výplňových materiálů a možnosti jeho měření. *Česká stomatologie*. 2018, **118**(4), 95-103.
2. JORDÁN, Tomáš. *Konstrukce stacionární jednotky pro nástřík maziva na kolejnici*. Brno, 2020, 65 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Martin Valena.
3. The History of the Toothbrush. *Smile concepts* [online]. Solihull, 2016 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://smileconcepts.co.uk/toothbrush-history/>
4. Historie zubních kartáčků. *Zubní kartáčky* [online]. 2019 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://zubacky.estranky.cz/clanky/historie-zubnich-kartacku.html>
5. CURAPROX CS5460: one of the world's softest toothbrushes. *Gently* [online]. Kriens, 2019 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://gently.curaden.com/curaprox-cs5460-one-of-the-worlds-softest-toothbrushes/>
6. Top 10 Toothbrushes for 2020: My Top 5 Manual Toothbrushes. *ArtLab Dentistry* [online]. 2020 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://artlabdentistry.com/top-10-toothbrushes-for-2020/>
7. LOVE, Jon. Our Top 5 Picks For Best Manual Toothbrush Explained. *Electric Teeth* [online]. 2020, 14 January 2020 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.electriceeth.com/uk/best-manual-toothbrush/>
8. How It's Made (CZ Dabing) - Zubní Kartáčky. In: *Youtube* [online]. 2009, 7. 3. 2009 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=QG3YjNaz-Sg>
9. Zuby, chrup jako celek. prořezávání zubů. *Anatomie člověka II: splachnologie, kardiovaskulární systém, žlázy s vnitřní sekrecí*. 2. vydání. Brno: Masarykova univerzita, 2019, s. 15. ISBN 978-80-210-9207-5.
10. Trávicí systém. *Junqueirovy základy histologie: Zuby*. Praha: Galén, 2018, s. 304-307. ISBN 978-80-7492-324-1.
11. Anatomie zubu. In: *zubatyblog.cz* [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.zubatyblog.cz/single-post/zubn%C3%AD-kaz>
12. Anatomie zubu. *Mudr-salek.cz* [online]. Ostrava, c2016 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://www.mudr-salek.cz/tipy-pro-vase-zuby/anatomie-zubu/>
13. SAINI, Rajiv, Santosh SAINI a Sugandha SHARMA. Biofilm: A dental microbial infection. *Journal of Natural Science, Biology and Medicine* [online]. 2011, 2011, **2**(1) [cit. 2021-03-29]. ISSN 0976-9668. Dostupné z: doi:10.4103/0976-9668.82317

14. Výplňové materiály. *Studio 32* [online]. Praha: MediGenia, 2018 [cit. 2021-5-17].  
Dostupné z: <https://www.studio32.cz/zubni-ordinace-klinika-studio32-pro-pacienty/bile-plomby-vyplne/vyplnove-materialy/>
15. ŠIKULA, Petr. *Držák kartáčku a vzorku* [elektronická pošta]. Message to: 211028@vutbr.cz. 7. května 2021 16:54 [cit. 2021-05-19]. Osobní komunikace.
16. Bruker UMT TriboLab Tribometer. *Blue Scientific* [online]. Cambridge (Velká Británie), 2015 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.blue-scientific.com/bruker-umt-tribolab/>
17. UMT TriboLab. *Bruker.com* [online]. c2021 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/test-and-measurement/tribometers-and-mechanical-testers/umt-tribolab.html>
18. Universal tribometr. In: *Direct industry* [online]. 2021 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/bruker-nano-surfaces/product-57554-1235281.html>
19. Understanding the effects of tooth brushing using an abrasive dentifrice on the wear of enamel. *Eprints.soton.ac.uk* [online]. Southampton: Mahdiyyah Baig, 2017 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/414915>
20. *Fraunhofer Institute for Mechanics of Materials IWM* [online]. Freiburg: Götz, c2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.iwm.fraunhofer.de/en.html>
21. Determining toothpaste abrasion. *Phys.org* [online]. Freiburg: Fraunhofer-Gesellschaft, 1 October 2012n. 1. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://phys.org/news/2012-10-toothpaste-abrasion.html>
22. Toothbrush simulator. *SD Mechatronic* [online]. Miesbacher: SD MECHATRONIK, 2019 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://sd-mechatronik.de/en/products/toothbrush-simulation/>
23. RUGGIERO, Alessandro, Roberto D'AMATO, Ludovico SBORDONE, Fernando Blaya HARO a Antonio LANZA. On the Dental BioTribology. *Proceedings of the Sixth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality* [online]. New York: ACM, 2018, 2018-10-24, **2018**, 440-446 [cit. 2021-03-31]. ISBN 9781450365185. Dostupné z: doi:10.1145/3284179.3284254
24. SINGH, RamPrakash, Sidhartha SHARMA, Ajay LOGANI, Naseem SHAH a Surendra SINGH. Comparative evaluation of tooth substance loss and its correlation with the abrasivity and chemical composition of different dentifrices. *Indian Journal of Dental Research*. New Delhi: Kluwer, 2016, **2016**(6), 630-636. ISSN 0970-9290. Dostupné z: doi:10.4103/0970-9290.199601

25. MECHANICAL TESTING SOLUTIONS FOR BIOMATERIALS AND TISSUES. *Biomomentum* [online]. Laval: Garon, 2021 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.biomomentum.com/>
26. Mach-1 - Evaluation of toothpaste in a teeth brushing simulator. In: *Youtube* [online]. Laval: Biomomentum, 2016 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=rYT3auSQpeo>
27. Jak vzniká kartáček? O kvalitě rozhodují vlákna, design i výrobní technologie. *ŽENA-IN* [online]. ŽENA-IN, 2019, 18. 9. 2019, **2019** [cit. 2021-4-30]. ISSN 1804-6576. Dostupné z: <https://zena-in.cz/clanek/jak-vznika-kartacek-o-kvalite-rozhoduji-vlakna-design-i-vyrobní-technologie>
28. HORÁČEK, Filip. Od rejžáků k čištění zubů. Kartáčky od Spokaru si razí cestu do Evropy. *Idnes.cz* [online]. Praha: idnes.cz, 2019, 27. dubna 2019 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/ekonomika/podniky/spokar-zubni-kartacky-stetce-zbrojka-spojene-kartacovny.A190426\\_190448\\_ekoakcie\\_fih](https://www.idnes.cz/ekonomika/podniky/spokar-zubni-kartacky-stetce-zbrojka-spojene-kartacovny.A190426_190448_ekoakcie_fih)
29. MIČKAL, Karel. *Strojnictví: části strojů*. Praha: Sobotáles, 1995, 220 s. : il. ISBN 80-85920-01-8.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

### 9.1 Seznam veličin

$f$	[Hz]	Frekvence
$f_T$	[-]	Součinitel tření
$F_N$	[N]	Normálová síla
$F_T$	[N]	Třecí síla
$F_Z$	[N]	Zatěžující síla
$n$	[-]	Počet kmitů
$R_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	Parametr drsnosti
$t$	[s]	Časová délka videa
$t_{\check{c}z}$	[min]	Doba čištění zubů denně
$t_{exp}$	[min]	Doba experimentu
$z$	[-]	Počet zubů dospělého zdravého člověka

### 9.2 Seznam zkratek

ČSN	Chráněné označení českých technických norem
DFH	Dynamic frequency hopping
DPH	Daň z přidané hodnoty
UK	Upínač kartáčku
UMT	Universal mechanical tester
UV	Upínač vzorku
ÚK	Ústav konstruování
3D	Trojdimenzionální



# 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

## 10.1 Seznam obrázků

Obr. 2-1	Schéma Interakce mezi kartáčkem a zubem .....	14
Obr. 2-2	Rozdělení kartáčků podle tvaru hlavice a tvaru štětín .....	15
Obr. 2-3	Rozložení sil na povrchu zubu: $F$ -Zatěžující síla; $F_T$ -Třecí síla; $F_V$ -Výsledná síla; $v$ -rychlost pohybu .....	16
Obr. 2-4	Řez svazky vláken (štětín): $\varnothing_v$ -průměr vlákna , $\varnothing_s$ -průměr svazku .....	16
Obr. 2-5	Bruker UMT TriboLab [18]: a) Rotary drive; b) Block-on-ring drive; c) Linear drive; d) Reciprocating drive .....	18
Obr. 2-6	Testovací sonda tvořená DFH senzorem, systémem odpružení (suspension) a adaptérem .....	19
Obr. 2-7	Simulátor University v Southamptonu [19] .....	20
Obr. 2-8	Simulator - Fraunhofer IWM [21] .....	21
Obr. 2-9	Upínač kartáčku – ZM-3.8 [22] .....	22
Obr. 2-10	Uložení vzorku – ZM-3.8; a) Zapuštění zubu; b) Zapuštění vzorku zubní výplně; Vytvořeno kompilací obrázků ze zdroje [22]. .....	23
Obr. 2-11	Princip zub-zub (Tooth-to-tooth contact) [23] .....	24
Obr. 2-12	Upínač vzorku pro simulátor - Tooth-to-tooth contact; a) Upínač se vzorkem zubu; b) Upínač se vzorkem keramické náhrady zubu; Vytvořeno kompilací obrázků ze zdroje [23]. .....	25
Obr. 2-13	Simulátor pro analýzu iterace zubní pasty a zubu; a) Podomácku vyrobený simulátor; b) Detail na upínač kartáčku a připevnění vzorku pomocí lepidla. Vytvořeno kompilací ze zdroje [24]. .....	26
Obr. 2-14	Simulátor Mach-1; Snímek byl pořízen z videa [26], v čase 0:09. ....	27
Obr. 2-15	Určení dráhy pohybu kartáčku; Vytvořeno kompilací snímků z videa [26].	28
Obr. 2-16	Výroba zubních kartáčku Spokar [27][28]. ....	29
Obr. 2-17	Princip upnutí kartáčku – Přiložení, natočení svěrek, fixace, vložení štětín do hlavice kartáčku. ....	29
Obr. 4-1	UK I; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	32
Obr. 4-2	UK II; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	33



Obr. 4-3	UK III; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	34
Obr. 4-4	UK IV – Varianta A; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ... .....	35
Obr. 4-5	UK IV – Varianta B; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ... .....	36
Obr. 4-6	UK V; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	37
Obr. 4-7	UV I; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	38
Obr. 4-8	UV II; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	39
Obr. 4-9	UV III; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	40
Obr. 4-10	UV IV; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	41
Obr. 4-11	Vana I; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	42
Obr. 4-12	Vana II; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	43
Obr. 4-13	Vana III; schéma konceptu, včetně názvů jednotlivých součástí. ....	44
Obr. 5-1	Upínač kartáčku; barevné schéma .....	46
Obr. 5-2	Minimální a maximální vzdálenost šroubů .....	47
Obr. 5-3	Uložení upínače v adaptéru simulátoru Bruker .....	47
Obr. 5-4	Silové působení na hlavici kartáčku.....	48
Obr. 5-5	Rozložení sil na přidržovači; červená šipka znázorňuje utahovací sílu; žluté šipky znázorňují reakční síly působící na přidržovač .....	49
Obr. 5-6	Vana; barevné schéma .....	50
Obr. 5-7	Vana vnější; Schéma montáže jednotlivých prvků.....	51
Obr. 5-8	Vana vnitřní; Rozměry pracovního prostoru. ....	51
Obr. 5-9	Rozměry vývrtů v rozích drážky pro příraz .....	52
Obr. 5-10	Schématické zobrazení problému s nadzvedáváním přírazu a jeho řešení; Červené šipky ve schématu znázorňují reakční síly působící na příraz.....	53
Obr. 5-11	Schéma spojení van včetně tolerovaných rozměrů spojovaných součástí; Červeně zvýrazněny hrany spojovaných částí van. ....	54
Obr. 5-12	Prototypy upínačů zubních kartáčků a van, vyrobené pomocí metody 3D tisk. .....	55
Obr. 5-13	Aplikace prototypů do simulátoru Bruker UMT TriboLab; a) Standartní aplikace modulů; b) Aplikace modulu s použitím pohybu vrchní části simulátoru. ....	55

Obr. 5-14	Upínače zubního kartáčku po zhotovení; Vyrobené ve společnosti Stránský a Petržík. ....	56
Obr. 5-15	Vany, po zhotovení; Vyrobené ve společnosti Stránský a Petržík. ....	57
Obr. 5-16	Clona A a B, sloužící k zamezení rozstříku kapek roztoku umělých slin a zubní pasty. ....	57
Obr. 5-17	Pouzdro pro upínač zubního kartáčku, vany a náhradních dílů; a) Detail na otevřené pouzdro; b) Výroba pouzdra. ....	58
Obr. 5-18	Fotografie simulátoru pro analýzu opotřebení a tření zubů při čišění .....	59

## 10.2 Seznam grafů

Graf 5-1	Analýza součinitele tření bez přítomnosti umělých slin.....	59
----------	---	----

## 11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1	Podmínky experimentu - University of Southampton [19] .....	21
Tabulka 2-2	Nastavitelné parametry – ZM 3.8 [22] .....	23
Tabulka 2-3	Podmínky experimentu - Tooth-to-tooth contact [23].....	25
Tabulka 2-4	Podmínky experimentu pro analýzu iterace zubní pasty a zubu [24] .....	27
Tabulka 2-5	Souhrn experimentálních podmínek z různých studií včetně podmínek, které budou použity v našem experimentu. ....	30
Tabulka 5-1	Součásti upínače kartáčku a jejich popis .....	46
Tabulka 5-2	Součásti sestavy vany a jejich popis .....	50
Tabulka 5-3	Cenová nabídka na výrobu přípravků od společnosti Stránský a Petržík.	56

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

2021-SL1-00	Sestava vany
2021-SL1-01	Vana vnitřní
2021-SL1-02	Vana vnější
2021-SL1-03	Příraz
2021-SL1-04	Prstencová podložka (nenormalizovaná)
2021-SL2-00	Sestava upínače kartáčku
2021-SL2-01	Tělo
2021-SL2-02	Přidržovač
2021-SL2-03	Šroub se zkosením (nenormalizovaný)