

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

POSOUZENÍ VLIVU ABRAZIVITY ZUBNÍ PASTY NA TŘENÍ, OPOTŘEBENÍ A ÚČINNOST ČIŠTĚNÍ ZUBNÍCH VÝPLNÍ

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF TOOTHPASTE ABRASIVENESS ON FRICTION, WEAR AND CLEANING
EFFICIENCY OF DENTAL FILLINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavla Formánková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Studentka: **Bc. Pavla Formánková**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **prof. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

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

Posouzení vlivu abrazivity zubní pasty na tření, opotřebení a účinnost čištění zubních výplní

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. Právě abrazivní částice, které jsou přítomny v současných zubních pastách, mohou zásadně přispět k předčasnému opotřebení zubních výplní. Díky experimentálnímu měření tření a opotřebení na tribometru Bruker UMT TriboLab a SEM analýz je možné objektivně posoudit, zda je vliv abrazivních částic v dané pastě významný.

Typ práce: výzkumná
Výstup práce: publikační výsledek (J, D)
Projekt: OP PIK a Inovační voucher

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je analýza součinitele tření a opotřebení mezi zubním kartáčkem a vzorkem zubní výplně. Dále bude posuzována účinnost čištění zubních past na základě úbytku plaku z povrchu zubní výplně.

Dílčí cíle diplomové práce:

- rešerše zásadních tribologických studií se zaměřením na analýzy vlivu složení a abrazivity zubních past na tření, opotřebení a účinnost čištění zubních výplní,
- návrh podmínek experimentů pro měření součinitele tření, opotřebení a účinnosti čištění v konfiguraci kartáček-zubní výplň na tribometru Bruker UMT TriboLab,
- analýza topografie třecích povrchů zubních výplní před a po simulaci procesu čištění zubů,
- měření součinitele tření a následné vyhodnocení míry opotřebení pro vybrané zubní pasty s různou mírou abrazivity a vybraný materiál zubní výplně,
- vyhodnocení morfologie a vlastností abrazivních částic ve vybraných zubních pastách pomocí SEM analýz a jejich vliv na opotřebení zubních výplní,
- fluorescenční a obrazová analýza úbytku plaku ze zubní výplně (účinnost čištění).

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

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

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

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

BIZHANG, M., I. SCHMIDT, Y.-H.P. CHUN, W.H. ARNOLD, S. ZIMMER a L.F. RODELLA. Toothbrush abrasivity in a long-term simulation on human dentin depends on brushing mode and bristle arrangement. PLOS ONE [online]. 2017, 12(2). ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0172060.

BAIG, M., R.B. COOK, J. PRATTEN a R. WOOD. Evolution of wear on enamel caused by tooth brushing with abrasive toothpaste slurries. Wear [online]. 2021, 476. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2020.203580.

MUNTEAN, Alexandrina; SAVA, Sorina; DELEAN, Ada Gabriela; MIHAILESCU, Ana Maria; DUMITRESCU, Laura Silaghi et al. Toothpaste Composition Effect on Enamel Chromatic and Morphological Characteristics: In Vitro Analysis. Online. Materials. 2019, roč. 12, č. 16. ISSN 1996- 1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12162610.

FERREIRA, Meire Coelho; RAMOS-JORGE, Maria Letícia; DELBEM, Alberto Carlos Botazzo a VIEIRAC, Ricardo de Sousa. Effect of Toothpastes with Different Abrasives on Eroded Human Enamel: An in situ/ex vivo Study. Online. The Open Dentistry Journal. 2013, roč. 7, č. 1, s. 132-139. ISSN 1874-2106. Dostupné z: doi:10.2174/1874210601307010132.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tribologické účinky zubních past byly doposud zkoumány především na sklovině a dentinu. Vzhledem k rostoucímu využití moderních výplňových materiálů je nezbytné zaměřit výzkum právě na tuto oblast. Diplomová práce zkoumá vliv vlastností abrazivních částic v zubních pastách na tření, opotřebení a účinnost čištění zubních výplní. Na základě toho je posouzena příznivost zubních past, tedy poměr účinnosti čištění vůči opotřebení a identifikovány pasty, které vykazují vysokou účinnost čištění při nízkém abrazivním účinku. Součinitel tření (CoF) je vyhodnocen jako časový průběh ze simulace čištění zubních výplní realizované na tribometru Bruker UMT TriboLab. Tribologická soustava se skládá ze tří komponent: zubního kartáčku Curaprox Ultra Soft 5460, vzorku zubní výplně a roztoku umělých slin (US) v kombinaci s vybranou zubní pastou. Opotřebení je kvantifikováno topografickou analýzou pomocí optického profilometru Bruker Contour GT-X. Struktura a prvkové složení abrazivních částic jsou zkoumány pomocí skenovacího elektronového mikroskopu Tescan MIRA3 s detektorem pro energiově disperzní rentgenovou spektroskopii (EDS). Pro měření účinnosti byl vytvořen umělý obarvený zubní plak, přičemž je zkoumán jeho časový úbytek fluorescenční a obrazovou analýzou po krátkých čistících intervalech. Výsledky vykazují, že tření v průběhu času je velmi variabilní, ovlivněné náhodnou přítomností částic v kontaktu. Rostoucí velikost, ostrost a koncentrace částic vedou k vyšším hodnotám tření i opotřebení. Dětské zubní pasty vykazují nižší míru opotřebení a po vyhodnocení se jeví jako příznivější v porovnání se zubními pastami pro dospělé. Fluorescenční analýza naznačuje závislost účinnosti čištění na velikosti částic a přítomnosti abraziv. Obrazová analýza tuto závislost nepotvrzuje. Tato práce představuje novou metodiku pro posouzení příznivosti zubních past, která je přínosem pro společnost i výrobce zubních past, jelikož poskytuje nástroj pro optimalizaci složení stomatologických produktů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Abrazivní částice, zubní pasta, opotřebení, tření, účinnost čištění

ABSTRACT

The tribological effects of toothpastes have so far been studied mainly on enamel and dentin. Given the increasing use of modern restorative materials, it is necessary to focus research in this area. This thesis investigates the effect of the properties of abrasive particles in toothpastes on friction, wear and cleaning efficiency of dental fillings. Based on this, the favourability of toothpastes, i.e. the ratio of cleaning efficiency to wear, is evaluated and toothpastes that exhibit high cleaning efficiency with low abrasive effect are identified. The coefficient of friction (CoF) is evaluated as a time course from dental filling cleaning simulations performed on Bruker UMT TriboLab tribometer. The tribological system consists of three components: a Curaprox Ultra Soft 5460 toothbrush, a tooth filling sample, and a mixture of artificial saliva (US) in combination with a selected toothpaste. Wear is quantified by topographic analysis using a Bruker Contour GT-X optical profilometer. The morphology and elemental composition of the abrasive particles are investigated using a Tescan MIRA3 scanning electron microscope with an energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) detector. To measure the cleaning efficiency, artificially stained dental plaque was created, and its time loss is investigated by fluorescence and image analysis after short cleaning intervals. The results show that the friction over time is highly variable, influenced by the random presence of particles in contact. Increasing size, sharpness and particle concentration lead to higher friction and wear values. Children's toothpastes exhibit lower wear rates and appear to be more favourable compared to adult toothpastes. Fluorescence analysis indicates a dependence of cleaning efficiency on particle size and the presence of abrasives. However, image analysis does not confirm this dependence. This work presents a new methodology for the assessment of the favourability of toothpastes, which is beneficial for society and toothpaste manufacturers as it provides a tool for optimizing the composition of dental products.

KEYWORDS

Abrasive particles, toothpaste, wear, friction, cleaning efficiency

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FORMÁNKOVÁ, Pavla. *Posouzení vlivu abrazivity zubní pasty na tření, opotřebení a účinnost čištění zubních výplní*. Brno, 2025. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu prof. Ing. Martinu Vrbkovi, Ph.D za jeho podporu, cenné rady a trpělivost v průběhu psaní celé diplomové práce. Velké díky za spolupráci patří výzkumné infrastruktuře CzechNanoLab (ID LM2023051, MŠMT, 2023–2026), CEITEC Vysoké učení technické v Brně, panu Pavlovi Čípkovi, Ph.D a všem, kteří se podíleli na projektu a psaní publikace. V poslední řadě bych moc ráda poděkovala svojí rodině za podporu a motivaci při studiu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, pod odborným vedením prof. Ing. Martina Vrbky, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpala, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	3
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	4
2.1	Rešeršní metody	4
2.2	Tribologie a biotribologie	5
2.3	Tření a opotřebení v dutině ústní	6
2.4	Výplňové materiály	6
2.5	Vliv zubní pasty na tření a opotřebení zubních povrchů	9
2.5.1	Historie zubních past	9
2.5.2	Současné složení zubních past	9
2.5.3	Abrazivní částice	10
2.5.4	Abrazivita zubních past	12
2.6	Kritická rešerše	12
2.6.1	Vliv vlastností abrazivních částic na opotřebení zubních povrchů	12
2.6.2	Vliv abrazivních částic na součinitel tření v kontaktu zubního povrchu a kartáčku	15
2.6.3	Účinnost čištění zubních past	17
2.6.4	Opotřebení zubních povrchů po čištění dětskými zubními pastami	21
2.7	Shrnutí hlavních zjištění	22
2.7.1	Výplňové materiály	22
2.7.2	Zubní pasty, abrazivní částice a jejich vliv na tření a opotřebení zubních povrchů	23
2.7.3	Účinnost čištění zubních past	24
2.7.4	Opotřebení zubních povrchů po čištění dětskými zubními pastami	24
2.8	Mezera v poznání	25
3	CÍLE PRÁCE	26
3.1	Výzkumné otázky	26
3.2	Cíle výzkumu	26
3.3	Hypotézy	27
4	MATERIÁL A METODY	28
4.1	Metodika	28
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	29
4.2.1	Tribometr Bruker UMT TriboLab	29
4.2.2	Optický profilometr Contour GT-X Bruker	29

4.2.3	Skenovací elektronový mikroskop (SEM) MIRA3 TESCAN	31
4.2.4	Fluorescenční mikroskop Nikon	32
4.2.5	Optický mikroskop Nikon	32
4.3	Materiál a testovací podmínky	33
4.3.1	Výplňové materiály pro vzorky zubních výplní	33
4.3.2	Experimenty pro vyhodnocení vlivů vlastností abrazivních částic na tření a opotřebení	33
4.3.3	Experimenty pro měření účinnosti čištění zubních past	37
4.4	Metody	43
4.4.1	Analýzy vlivu vlastností abrazivních částic na tření a opotřebení zubních výplní	43
4.4.2	Analýzy účinnosti čištění zubních past	45
4.5	Testované predikce	47
5	VÝSLEDKY	48
5.1	Součinitele tření (CoF)	48
5.2	Objemový úbytek vzorků zubních výplní	49
5.3	Morfologie a prvkové složení abrazivních částic	50
5.4	Účinnost čištění zubních past	54
5.4.1	Fluorescenční analýza	54
5.4.2	Obrazová analýza	57
5.5	Příznivost zubních past	59
6	DISKUZE	61
6.1	Interpretace výsledků	61
6.1.1	Vliv abrazivních částic na součinitel tření (CoF)	61
6.1.2	Vliv abrazivních částic na opotřebení zubních výplní	62
6.1.3	Účinnost čištění zubních past	64
6.1.4	Příznivost zubních past	66
6.2	Verifikace hypotéz	67
7	ZÁVĚR	69
8	VÝSLEDKY VÝZKUMU PODLE RIV	71
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	79
11	SEZNAM TABULEK	82

1 ÚVOD

V současnosti je ve stomatologii velkým tématem tření, opotřebení a účinnost čištění v dutině ústní. Kromě vnitřních vlivů, jako jsou tvrdost zubních povrchů nebo pH slin, jsou tribologické faktory ovlivněny také vnějšími vlivy. Jedná se například o stravu, volbu zubního kartáčku nebo zubní pasty s určitou hodnotou relativní dentinové abrazivity (RDA). Právě tato hodnota popisuje abrazivní účinek zubní pasty na povrch dentinu, což je zásadní z hlediska opotřebení zubních povrchů.

V posledních letech postupně dochází k přechodu od tradičních amalgámů k moderním materiálům, jako jsou skleněné amalgámy, cementy, kompomery, kompozity a další. V porovnání se sklovinou a dentinem však nebyly nové materiály zubních výplní podrobeny tak detailním výzkumům. Proto je snaha o odhalení abrazivních účinků zubních past právě na tyto nově využívané materiály. Jejich rozdílné vlastnosti ve srovnání se zubními povrchy mají přímý dopad na jejich stabilitu a odolnost vůči chemickým vlivům v zubním prostředí.

Posouzení účinků abrazivních částic na výplňový materiál je nezbytné pro komplexní zhodnocení účinnosti mechanického čištění ve srovnání s opotřebením protetických materiálů. Jako maximálně příznivá pasta se jeví pasta s nízkým abrazivním účinkem a vysokou účinností čištění. Z pohledu zákazníka je nutné vzít v úvahu širokou škálu zubních past dostupných na trhu, což komplikuje výběr ideální pasty. Hlavním cílem práce je tedy zjistit, zda existují pasty, jež zmíněné vlastnosti splňují. Pacienti, kteří si nechají zhotovit zubní výplň, totiž očekávají, že bude dlouhodobě odolná a vydrží opotřebení způsobené každodenním použitím zubní pasty. Tomu také chtějí přizpůsobit její výběr.

První z nutných částí výzkumu bude simulace čištění výplňových materiálů vybranými zubními pastami, z nichž bude získáno tření a pomocí analýz topografie povrchu opotřebení. Pro analýzu detailního složení zubních past bude využita skenovací elektronová mikroskopie, která bude schopna poskytnout jak podrobnou morfologickou, tak i prvkovou analýzu abrazivních částic. Získané informace umožní odhalit, jak vlastnosti abrazivních částic ovlivňují zmíněné tribologické faktory. Účinnost čištění vybraných past bude měřena pomocí fluorescence a obrazové analýzy na základě rychlosti úbytku obarveného zubního plaku po krátkých čistících intervalech. Jako souhrnný výsledek bude vyhodnocen poměr účinnosti čištění ku opotřebení pro vybrané zubní pasty jako hodnota příznivosti. Ta může odhalit zákazníkům, jaké pasty jsou pro ústní hygienu vhodné nebo naopak napovědět výrobcům, jak modifikovat složení pro dosažení ideální zubní pasty.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

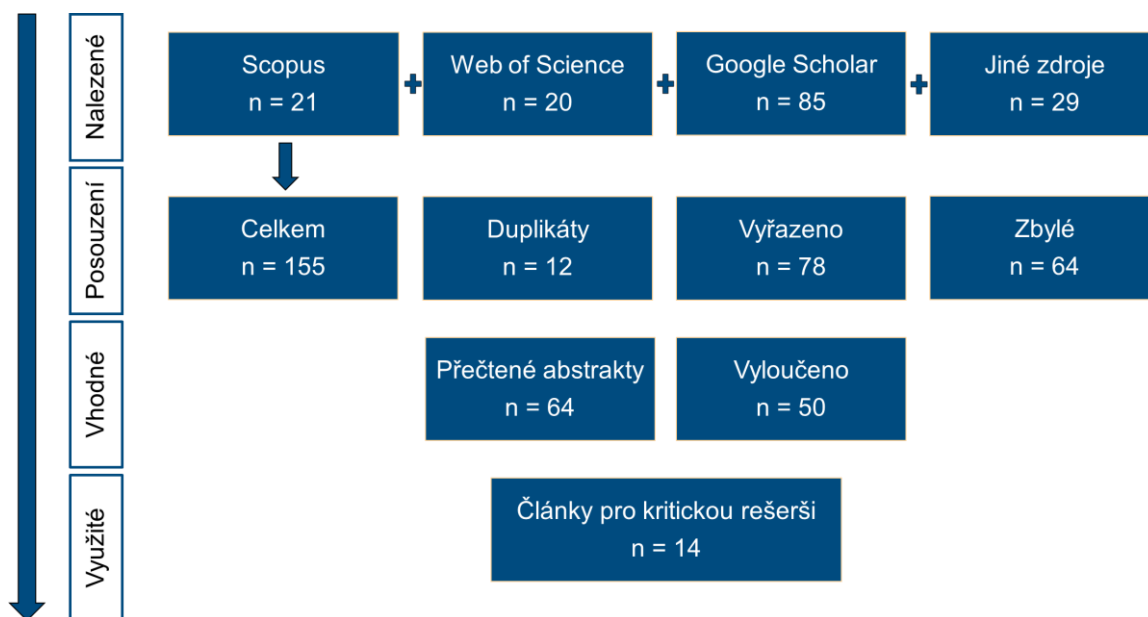
2.1 Rešeršní metody

Po seznámení se s tématem bylo nutné specifikovat otázky práce pro systematickou rešerši. Otázky byly zaměřeny na tření, opotřebení a účinnosti čištění pro dentin, sklovinu a výplňové materiály po čištění klasickými a dětskými zubními pastami. Z otázek byly vytvořeny rešeršní dotazy pro vybrané databáze (Scopus, Web of Science, Google Scholar) s pomocí booleovských operátorů. Celkem byly vytvořeny 4 rešeršní dotazy, jež byly postupně konkretizovány do finální podoby (Tabulka 2-1) pro získání odpovídajících studií.

Tabulka 2-1: Počty studií rešeršních dotazů pro vybrané databáze

Rešeršní dotaz	Scopus	Web of Science	Google Scholar
O1: ("abrasive particle" OR abrasives) AND (wear OR abrasion) AND (friction OR "coefficient of friction") AND (cleaning OR brushing OR "tooth cleaning")	61	81	7830
O2: ("abrasive particle" OR abrasives) AND (wear OR abrasion) AND (dentifrice OR toothpaste) AND (brushing OR cleaning) AND (filling OR seal OR "filling material")	4	8	747
O3: (dentifrice OR toothpaste) AND ("abrasive particle" OR abrasives) AND ("stain removal") AND brushing AND (wear OR abrasion)	8	5	506
O4: (wear OR abrasion) (toothpaste OR dentifrices) AND (children) AND (brushing OR cleaning OR „tooth cleaning“) AND (gel)	2	4	10500

Z dotazů bylo pomocí tří databází vyhodnoceno určité množství potenciálně využitelných publikací (Obr. 2-1 - nalezené). Ne všechny však souvisely s tématem, proto byla nutná další filtrace. Postupně byly vyřazeny duplicitní články a studie, které se netýkaly tématu (Obr. 2-1 - posouzení). Další krok bylo prostudování abstraktů zbylých publikací, zhodnocení korespondence s tématem a využitelnosti pro naši práci (Obr. 2-1 - vhodné). Všechny kroky vedly k získání 14 článků, jež budou následně kompletně prostudovány a využity v kritické rešerši (Obr. 2-1 - využité). Celý postup filtrace zobrazuje Prisma diagram níže (Obr. 2-1).



Obr. 2-1: Prisma diagram

2.2 Tribologie a biotribologie

Vědní obor zabývající se třením, opotřebením a mazáním se nazývá tribologie. Jedná se o multidisciplinární obor, který zahrnuje poznatky z fyziky, chemie, materiálových věd a mechaniky. Tribologie je věda aplikovaná jak ve strojírenství, tak i v biomedicině. Jedním z podoborů této vědy je obor biotribologie, jež se zaměřuje na studium zmíněných jevů v lidském těle. V této oblasti se zkoumají například interakce mezi implantáty a tkáněmi, využití biomateriálů v lékařství, modifikace složení nejrůznějších maziv pro redukci tření v kloubech a tkáních, snížení tření a opotřebením zubních materiálů nebo například úpravy tření v očním kontaktu pomocí umělých slz.

Díky tribologickým analýzám je možné vyhodnocovat průběhy třecích součinitelů, množství opotřebovaného materiálu či drsnost a topografii povrchu po tření a opotřebením. Na základě těchto výsledků je pak cílem optimalizovat složení maziva nebo samotný výběr a složení materiálu. Všechny výzkumy a studie v oblasti biotribologie jsou klíčové prvky pro vývoj dlouhodobě funkčních přípravků. Zlepšení vlastností biomateriálů a optimalizace jejich třecích charakteristik může totiž přispět ke zlepšení kvality života pacientů a snížení nákladů na zdravotní péči.

2.3 Tření a opotřebení v dutině ústní

Jednou z oblastí, kterou se biotribologie zabývá je tření a opotřebení v dutině ústní. V důsledku mechanického obrušování, které může být dvousložkové nebo tříložkové, dochází v dutině ústní k opotřebení zubních povrchů a výplňových materiálů. Ke dvousložkovému tření a opotřebení dochází v případě kontaktů zubů a výplňových materiálů. K tříložkovému otěru (abrazi) pak například při stravě nebo ústní hygieně, kdy jsou v kontaktu kromě dvou kontaktních povrchů přítomny i další, tzv. abrazivní částice, které působí jako brusný materiál. Proto je pro výzkum i klinickou praxi zásadní sledování těchto faktorů, které mohou negativně ovlivnit zubní povrchy a výplňové materiály z hlediska tření a opotřebení. V dutině ústní hovoříme o výběru zubního kartáčku, používané zubní pasty a v případě náhrad pak i o výběru vhodného výplňového materiálu [1, 2, 3].

Velkým tématem z hlediska tření a opotřebení v dutině ústní jsou právě účinky zubních past na výplňové materiály. Důsledné modelování tření a opotřebení je důležité nejen pro předpověď výběru dentálních materiálů, ale také pro hodnocení vlivu tření a opotřebení na kvalitu výplně ve spojitosti s účinky vybrané zubní pasty a zubního kartáčku. Sledování odolnosti výplňových materiálů společně s analýzou využitých zubních past a kartáčků vyžaduje přístup, který kromě tribologie zahrnuje techniky, jako je interferometrie nebo skenovací elektronová mikroskopie [4].

2.4 Výplňové materiály

V posledních letech byly rozšířeny terapeutické možnosti ošetření zubních kazů o nové techniky preparace zubů a výplňové materiály. Došlo k výraznému zlepšení estetiky výplní z tvrdých tkání a bylo dosaženo lepší biokompatibility se zubními tkáněmi [5]. Všechny pokroky jsou spojeny se specifickými vlastnostmi, které přispívají k mechanické odolnosti. V případě výběru vhodných výplňových materiálů jsou významnými faktory z hlediska opotřebení kromě biokompatibility a fyzikálně-chemických vlastností také vlastnosti mechanické, umístění výplně, velikost poškozeného prostoru, estetika a nákladovost. Využívanými materiály pro zubní výplně jsou v současné chvíli kovy, keramika, kompozitní výplňové materiály, polymery a cementy (Obr. 2-2) [6].

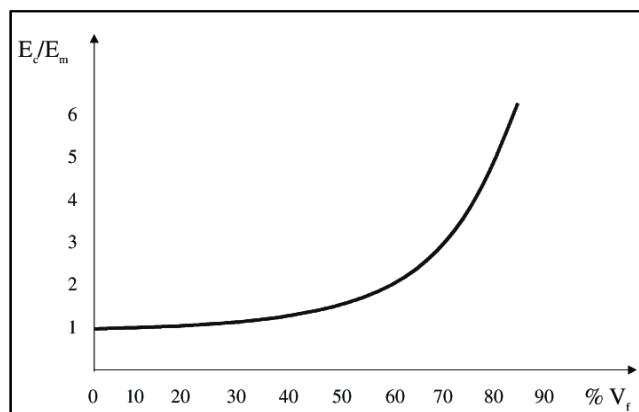


Obr. 2-2: Druhy výplňových materiálů [7]

V minulosti byly často voleny amalgámové materiály. Tyto dentální materiály se vyznačují vysokou odolností vůči opotřebení, jelikož povrchové napětí je kompenzováno schopností materiálu plasticky se deformovat. Jedná se o materiály s vysokou životností, spolehlivostí a cenovou dostupností. V posledních letech se však od těchto materiálů odvrací pro jejich neestetický vzhled a možnou toxicitu skrze vyšší obsah rtuti [6, 8]. O kovech se původně uvažovalo kvůli jejich vynikající mechanické a korozní odolnosti. Nejsou však dostatečně biokompatibilní s ústním prostředím. Kromě amalgámů se z kovových materiálů využívalo hojně také zlato nebo nerezové oceli. I přes jejich výhodné vlastnosti je ale stále riziko uvolňování škodlivých látek do těla a současně nejsou vyhovující pacientům z důvodů estetiky. Zubní výplně z titanu jsou naopak šetrnější z hlediska uvolňování materiálů, nicméně vykazují poměrně vysoké opotřebení [6, 8].

Postupně se tedy přechází ke keramickým materiálům, cementům nebo kompozitům. V případě keramiky se jedná o materiál esteticky přívětivý, odolný vůči opotřebení, biokompatibilní, ale s vysokou křehkostí [6, 8]. Cementy jsou stejně jako keramiky křehké a mají nízký modul pružnosti. Jednou z nejvyužívanějších variant cementů jsou skloionomerní cementy, které se vyznačují vysokou biokompatibilitou. Jejich základem je iontově vápenaté fluoraluminosilikátové sklo a díky obsahu karboxylových skupin mohou reagovat s hydroxyapatitem ze zubního povrchu a spojovat tak cement s tvrdými zubními tkáněmi [9]. Tyto materiály dokonce při tuhnutí uvolňují fluoridy do okolí díky acidobazickým reakcím, což je příznivé z hlediska zabraňování vzniku zubního kazu. Současně jsou strukturně podobné kompozitům, kde nezreagované částice skla jsou plnivem a zbytek tvoří matici. Reakční částice mezi těmito složkami pak tvoří iontové vazby, díky kterým je zajištěno zesíťování matrice a tuhnutí cementů. Celkově jsou cementy odolné proti poškození, nicméně mají nízkou lomovou houževnatost, a to vede k nedostatečným mechanickým vlastnostem, omezujícím jejich využití jakožto výplňových materiálů [8]. Proto je snaha o zlepšení vlastností při zachování adheze k povrchu a uvolňování fluoridů.

Nejvyužívanější skupinou v posledních letech jsou kompozitní materiály. Ty se vyznačují dobrou biokompatibilitou, chemickou inertností a dobrou manipulací při klinickém použití. Nadměrné opotřebení je největší výzvou při jejich aplikaci [6]. Jedná se o multikomponentní materiály s inovativními vlastnostmi [10, 11]. Konkrétně jsou kompozity tvořeny dvěma vzájemně nerozpustnými složkami – maticí a plnivem, lišící se formou a chemickým složením. Matrice je základní souvislý polymer látky a plnivo tvoří výztuž a zajišťuje vhodné mechanické vlastnosti. Je důležitá vysoká koheze mezi oběma složkami. Čím větší je objem částic plniva, tím vyšší má látka modul pružnosti (Obr. 2-3).



Obr. 2-3: Závislost modulu pružnosti na objemu plniva [9]

Pro zajištění vazby mezi matricí a plnivem jsou částice plniva pokryty silanovými činidly, kdy kvalita a rozsah silanu povlaku má vliv na kvalitní soudružnost kompozitu a jeho mechanickou pevnost. Materiál by měl totiž odpovídat tvrdé tkáni, kterou nahrazuje. Rozhodující je modul pružnosti (dentin 18 GPa, sklovina 80 GPa). Hybridní kompozit vykazuje hodnoty modulu pružnosti v rozmezí 15-25 GPa, tedy dobře nahradí dentin, nicméně se nepřiblíží tvrdosti skloviny. Tyto materiály mají větší sklon ke korozi, jelikož dochází k naleptání povrchu v přítomnosti rozpouštědel a materiál je tak náchylnější k opotřebení v lubrikovaných podmínkách. Pro vyšší odolnost vůči opotřebení jsou do kompozitních materiálů přidávány anorganické látky, jako je např. oxid křemičitý [10, 11]. Studie různých typů plniv a materiálů s různými hmotnostními podíly stále probíhají s cílem zlepšení tribologických vlastností pryskyřičných kompozitů jako výplňových implantátů.

Posledními z využívaných materiálů jsou látky zvané kompomery. Jedná se o spojení kompozitu a skloionomerního cementu. Kompomery jsou tak obohaceny o výhodné vlastnosti obou materiálů. Řadí se mezi cementy, ačkoliv se neusazují díky kyselinám a neváží se na tvrdé zubní tkáň. Vlastnostmi by mohly být zařazeny do kompozitů s menším objemem plniva a neúplnou silanizací. To způsobuje nižší schopnost adheze, mechanickou pevnost a hladinu uvolňování fluoridů ve srovnání s plně silanizovanými kompozity. Jedná se tedy o méně kvalitní kompozit, který má nižší modul pružnosti, pevnost, houževnatost, tvrdost a vyšší opotřebení. Dobrou vlastností je ale výborná biokompatibilita a manipulace díky jejich nízké viskozitě a výborná schopnost uvolňování fluoridů pro zabránění vzniku kazu. Kompomery jsou často využívány jako spojovací systémy, adheziva a dentální výplně [9].

2.5 Vliv zubní pasty na tření a opotřebení zubních povrchů

2.5.1 Historie zubních past

Historie vývoje zubních past sahá až do 5. století před naším letopočtem, kdy byly poprvé vyvinuty práškové směsi. Tyto směsi byly v Egyptě tvořeny především sazemi, zatímco v Řecku se používaly rozdrcené kosti a skořápky. Primárním cílem těchto směsí bylo odstranění tvrdších usazenin na zubech, což samotné kartáčky nedokázaly dostatečně efektivně zajistit. Tyto prášky se aplikovaly na kartáčky a sloužily k mechanickému čištění zubů. Již v této rané fázi bylo žádoucí dosáhnout svěžího dechu. Římané se tohoto cíle snažili dosáhnout přidáním aromatických látek do svých zubních prášků, Číňané obohacovali své směsi o byliny, zejména mátu a sůl. Tyto přísady nejenže zlepšovaly chuť a vůni směsí, ale také přispívaly ke zlepšení ústní hygieny a celkového zdraví dutiny ústní [12].

Do roku 1850 byla většina zubních past práškovité konzistence. V 19. století se však začaly vyrábět pasty obsahující mýdlo, dřevěné uhlí a křídou. Význam ústní hygieny začal narůstat na přelomu 19. a 20. století, kdy společnost Colgate vytvořila první zubní pastu v tubě [12]. Zpočátku bylo čištění zubů zubní pastou zaměřeno především na dezodorizaci a celkovou hygienu. Po druhé světové válce prošly zubní pasty významnými změnami ve složení, především za účelem zlepšení schopnosti zabraňovat vzniku zubních kazů, čehož bylo dosaženo zvýšením obsahu fluoridů jako remineralizačních látek [13]. Pasty s fluoridem se staly klíčovým preventivním nástrojem v boji proti vzniku a progresi zubního kazu, zejména u dětí [14].

2.5.2 Současné složení zubních past

V současné době je řešena modifikace složení zubních past tak, aby bylo dosaženo minimálního opotřebení při maximální účinnosti čištění. Zubní pasty obsahují aktivní a neaktivní látky, u kterých je vyžadována biokompatibilita pro jejich účinnost a klinickou přijatelnost. Aktivní složky mají terapeutické účinky, zatímco neaktivní složky zajišťují soudružnost látek v pastách a mají specifickou barvu a chuť pro zvýšení atraktivity pasty [15].

Základem všech zubních past jsou abrazivní částice, detergenty a aromatické látky. Dále jsou do past přidávány nejrůznější látky pro léčebné nebo preventivní účely, pojiva, zvlhčovačla nebo barviva [12, 15]. Aby byla spojena kapalná a pevná fáze, bývá do past přidáváno pojivo, které zajišťuje stabilní suspenzi zubní pasty a může být využíváno pro zahuštění. Detergenty neboli látky zajišťující čištění, jsou díky své pěnivosti schopny dostat se do zubních povrchů a snížit povrchové napětí, pasta tak uvolňuje nečistoty a usazeniny plaku. Pro zabránění tvrdnutí jsou v pastách přítomny zvlhčovačla zabraňující vysychání pasty [15].

Pro odstranění skvrn lze do zubních přípravků přidávat bělicí látky. Tohoto účinku se dosahuje přidáním chemických látek, jako je peroxid vodíku. Zubní pasta by kromě celkového čištění a bělení měla poskytovat lesklý povrch a zabraňovat tvorbě zubního plaku. Pro zamezení růstu zubního plaku a zánětu dásní se do zubních past přidává léčivá látka triklosan. Ta činí membránu bakterií propustnou, což umožňuje látce proniknout do bakterie a mikroorganismus usmrtit [16].

2.5.3 Abrazivní částice

Jak již bylo zmíněno výše, cílem výzkumu a vývoje bylo a je vytvořit přípravky, které účinně čistí zubní povrchy při zachování určité míry šetrnosti. Aby však pasty účinně čistily, je třeba přítomnosti abrazivních látek, které jsou určeny pro dokonalé čištění zubních povrchů. Rizikem je však jejich nerozpustnost ve vodě a s tím spojené zvyšování tření a opotřebení v dutině ústní. Kromě stravy patří mezi faktory ovlivňující opotřebení v dutině ústní totiž samotná hygiena. Tedy výběr zubního kartáčku a zubní pasty se zmíněnými abrazivními složkami, které se na opotřebení podílejí. Rizikem opotřebení zubních povrchů je z dlouhodobého hlediska hypersensitivita dentinu, zmenšení výšky skusu nebo výrazný úbytek zubního povrchu a nutnosti jeho náhrady [12].

Vývoj zubní pasty obsahující abrazivní částice úzce souvisí s hodnocením komplexního opotřebení, kde je abrazivita jedním z hlavních faktorů. Zásadní význam mají vlastnosti těchto abrazivních částic související s opotřebením a třením (Tabulka 2-2). Například morfologie pevných částic a způsob, jakým tyto částice interagují, se mohou měnit v závislosti na tom, jak jsou tyto částice rozloženy nebo zda mají tendenci se shlukovat. To znamená, že materiály používané v zubních pastách se za různých podmínek chovají odlišně [11]. Výzkum naznačuje, že vlastnosti abrazivních částic, jako je tvar, velikost, tvrdost, koncentrace, pH zubní pasty nebo přítomnosti konkrétních složek v pastách (Tabulka 2-2) [2, 12, 17], významně ovlivňují opotřebení.

Tabulka 2-2: Vliv vlastností abrazivních částic na opotřebení zubních povrchů [12]

Vlastnosti	Popis
Velikost částic	Čím větší jsou částice, tím větší je hloubka opotřebení na zubním povrchu.
Tvar částic	Čím je tvar nepravidelnější, tím více dochází k opotřebení a obrušování zubních povrchů. Sférické částice způsobují menší opotřebení zubů.
Tvrdost částic	Čím jsou částice tvrdší, tím více obrušují zubní povrchy.
Koncentrace	Čím vyšší je koncentrace abraziv, tím větší je množství odstraněné zubní tkáně.
pH hodnota	Čím je zubní pasta kyselejší, tím vyšší je míra ztráty minerálů ze zubního povrchu.
Množství glycerinu a vody v zubní pastě	Čím vyšší je obsah glycerinu v zubní pastě, tím vyšší je její abrazivita. Glycerin snižuje rozpouštění nerozpustných látek. Čím více vody zubní pasta obsahuje, tím více se rozpustné částice rozpouštějí, což vede k menší abrazivitě na zubních površích – platí pro specifické abrazivní látky, jako je například hydrogenuhličitan.

Mezi využívané abrazivní látky v zubních pastách patří fosfáty, uhličitany a oxidy křemíku, hliníku nebo například zinku. Šetrná zubní pasta by měla obsahovat nerozpustných brusných látek pod 20 % hmotnosti složení, ideálně zmiňovaných 12-15 % [12]. Všechny tyto částice ovlivňují jak účinnost čištění, tak opotřebení zubních výplní. Jejich účinky jsou spojeny s výše zmíněnými vlastnostmi abrazivních částic. Pokud jsou abraziva příliš tvrdá, může dojít k poškozování zubních povrchů, na druhou stranu příliš měkká abraziva nejsou schopna dokonale odstranit skvrny a je tak nutné najít vhodný poměr při modifikaci složení pro vytvoření dokonalých vlastností zubní pasty [15].

Abrazivní složky můžeme dále rozdělit na nerozpustné a rozpustné, to opět souvisí s opotřebením povrchů. Mezi nerozpustné, a tedy agresivnější z užívaných abraziv patří oxidy křemíku a hliníku. Rozpustným abrazivem je pak často užívaný hydrogenuhličitan sodný (jedlá soda).

2.5.4 Abrazivita zubních past

Vlastností každé zubní pasty je hodnota relativní dentinové abrazivity (RDA), která popisuje schopnost pasty opotřebit dentin. Zahrnuje množství, povrchovou strukturu, velikost částic a dále chemické vlivy přísad přítomných v pastě. Měření RDA probíhá podle normy ISO 11609. Nejvyužívanější metodou vyhodnocení je **metoda hloubky řezu (metoda povrchového profilu)**, která spočívá ve skenování vzorku před a po čištění zubního povrchu, následné simulaci čištění a vyhodnocení RDA podle množství odstraněného dentinu. Reference 100 vychází z výsledků měření s abrazivem pyrofosfátem vápenatým. Pokud se využije pro měření metoda hloubky řezu, neměla by úroveň abrazivity dentinu překročit dva a půl násobek pyrofosforečnanu vápenatého (Tabulka 2-3), aby byly pasty považovány za klinicky přijatelné [3, 11, 12]. U skloviny by abrazivita neměla překročit čtyřnásobek pyrofosforečnanu vápenatého.

Tabulka 2-3: Hodnoty RDA a úrovně opotřebení [1]

Hodnota RDA	0-70	70-100	101-150	151-250
Úroveň abrazivity	Nízká abrazivita	Střední abrazivita	Vysoká abrazivita	Považováno za škodlivý limit

2.6 Kritická rešerše

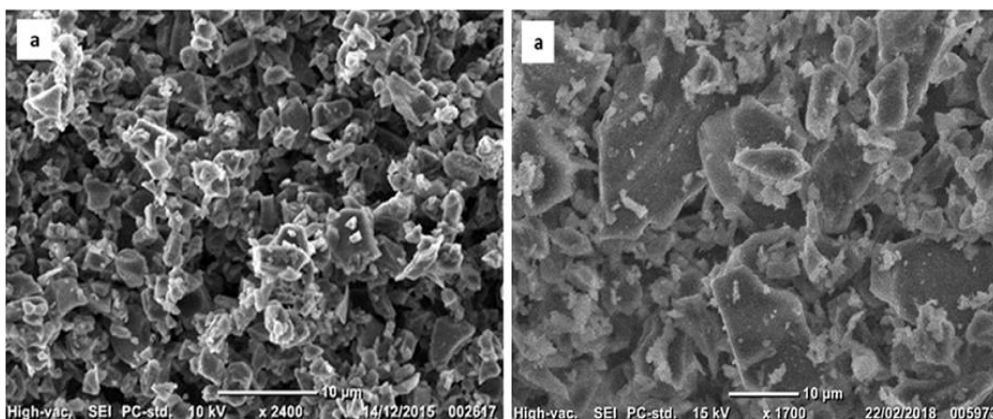
2.6.1 Vliv vlastností abrazivních částic na opotřebení zubních povrchů

První studie popisuje pozorování vztahu vlastností abrazivních částic k opotřebení povrchů zubních vzorků [18]. Testované vzorky byly z hovězí skloviny a v experimentech byl zkoumán vliv velikosti, tvaru a rozložení částic na opotřebení. Každý ze vzorků byl podroben testu v časovém intervalu jedné minuty pro tři různá zatížení: 0,1 N, 0,2 N a 0,5 N. Opotřebení bylo hodnoceno pomocí optické mikroskopie a vlastnosti stop po čištění skenovací elektronovou mikroskopií.

Pro měření bylo využito několik sad hovězích vzorků pro dva typy abrazivních částic (oxid hlinitý a křemičitý, Obr. 2-4) o následujících velikostech:

- SiO₂: 1 μm, 5 μm, 5 μm s kulovitými částicemi a 9 μm,
- Al₂O₃: 1 μm, 5 μm, 10 μm,
- bimodální částice vzniklé spojením SiO₂ 5 μm + 9 μm a Al₂O₃ 5 μm + 10 μm.

Vzorek zubů byl ponořen do suspenze umělých slin s abrazivou a následoval tribologický experiment s nylonovým nanoindentorem pohybujícím se rychlostí 16,7 $\mu\text{m/s}$ na délce 500 μm .



Obr. 2-4: Snímky abrazivních částic SEM: Al_2O_3 – vlevo, zvětšeno 2,2kx, SiO_2 vpravo, zvětšeno 1,7kx [18]

Bylo odhaleno, že sférické částice mají tendenci způsobovat nižší míru opotřebení zubů a tvořit v povrchu jemnější rýhy. S větší velikostí částic nebo shluků se ztrácí schopnost přiléhat na štětiny kartáčku, a částice jsou posouvány po povrchu, což zvyšuje míru opotřebení. Zároveň větší částice či seskupení zvyšují přenos zatížení a důsledkem jsou větší rýhy opotřebení. Maximální opotřebení v této studii bylo výsledkem po čištění s bimodálními částicemi. V porovnání pro oba druhy abraziv byl prokázán menší úbytek materiálu pro menší částice Al_2O_3 (Obr. 2-4).

Menší částice jsou k povrchům šetrnější, zejména, pokud mají zaoblené tvary a nižší tvrdost [12]. Obecně platí, že s klesající tvrdostí materiálu, klesá jejich abrazivita a tím i celkové opotřebení povrchu [12, 18, 19]. Z hlediska Mohsovy stupnice tvrdosti jsou pro šetrný výběr abraziv doporučeny hodnoty menší než 2. Nicméně do bělicích přípravků jsou často přidávána abraziva vyšší tvrdostí pro lepší odstranění skvrn, což zvyšuje riziko abraze materiálu [12].

Jedna ze studií [20] se částečně věnovala spojitosti tvrdosti částic a míry abraze zubních povrchů. Podle Mohsovy stupnice je tvrdost dentinu v rozmezí od 2-2,5. Pro hydrogenuhličitan sodný (jedlou sodu) je hodnota tvrdosti zhruba 2,5, pro oxid křemičitý 2,5 – 5 a pro oxid hlinitý kolem hodnoty 9. Jedlá soda má z porovnávaných abraziv tvrdost nejbližší dentinu a vykazuje nižší míru opotřebení. Blízké hodnoty tvrdosti částic a čištěného povrchu tedy vykazovaly snížené hodnoty opotřebení. Současně má jedlá soda velmi nízkou hodnotu RDA (7) a kromě těchto vlastností použití past s obsahem tohoto abraziva zvyšuje účinnost čištění díky schopnosti snížení pH (viz níže).

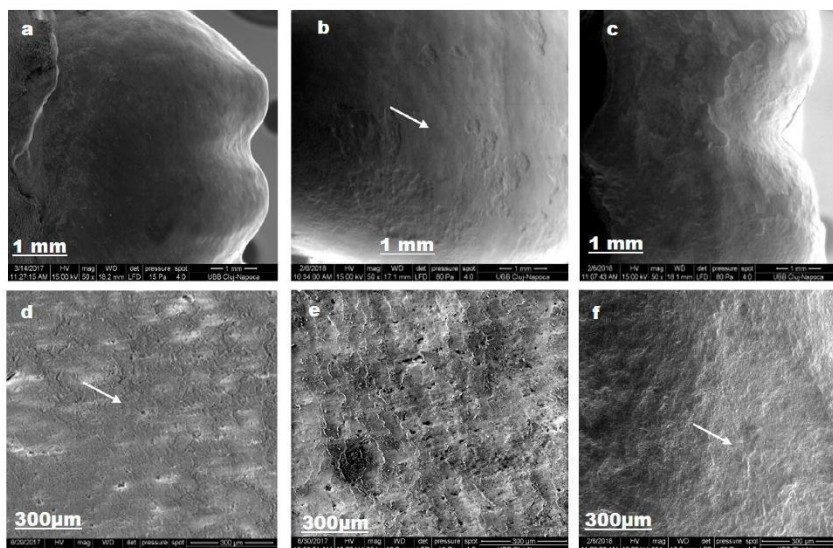
Výzkum abrazivních účinků zubních past bez fluoridů na erodovanou sklovinu byl uskutečněn máčením vzorků v nealkoholických sladkých nápojích [19]. Pasty byly na bázi CaCO_3 a SiO_2 . Publikace byla zaměřena na snahu o minimalizaci škodlivých účinků na erodovaný povrch. Vzorky lidské skloviny byly čištěny v časovém intervalu 30 sekund bez máčení vzorků, dále ihned po namočení ve sladkém nápoji a poté po hodině máčení. Výsledky prokázaly, že pokud jsou povrchy skloviny erodované, hodnoty opotřebení jsou mírně vyšší. Co se týče porovnání abrazivních částic, tak vyšší výsledky abraze vyšly pro částice SiO_2 (Tabulka 2-4).

Tabulka 2-4: Porovnání drsností a hloubek opotřebení pro abrazivní částice CaCO_3 a SiO_2 po čištění 30 s bez namočení do sladkého nápoje, ihned po namočení a po máčení po dobu jedné hodiny [19]

Skupiny	Změna R_a Median*	Hloubka opotřebení [μm] Median*
CaCO_3		
CaCO_3 , kontrola	0.16	5.84
CaCO_3 , ihned	0.30	9.06
CaCO_3 , po 1 h	0.27	9.08
SiO_2		
SiO_2 , kontrola	0.18	10.45
SiO_2 , ihned	0.31	8.66
SiO_2 , po 1 h	0.28	12.4

Kromě vlastností, jako je tvar, velikost, rozložení nebo tvrdost má na opotřebení vliv i pH zubní pasty [21]. Zubní tkáň prochází neustálou demineralizací a remineralizací. Pokles pH zubního povrchu způsobuje demineralizaci neboli ztrátu minerálů z povrchu zubu. Tento jev je způsoben přítomností kyselin (nízké hodnoty pH), které narušují povrch struktury skloviny a zvyšují tím její citlivost na chlad, teplo, tlak a celkové opotřebení. Je tedy požadováno, aby hodnoty pH zubních past byly v rozmezí 5,5 – 10,5 a byly dostatečně zásadité. Pokud je pH vyšší než 5,5, ukládají se na povrchu zubů částice vápníku, fluoridu nebo fosfátů. Kromě odstranění skvrn tedy pasty způsobí, že po čištění je zub schopen vstřebat minerální zdroje ze slin a pasty. Vzorky lidských zubů byly při tomto experimentu skladovány v umělých slinách při 37 °C, dále čištěny 2-3 minuty 2x denně po dobu 21 dnů pěti různými pastami. Druhá sada vzorků byla demineralizována v kyselině ortofosforečné po dobu 60 s, následně proběhlo sušení a stejné experimenty. Opotřebení a povrchy po experimentech byly měřeny pomocí SEM.

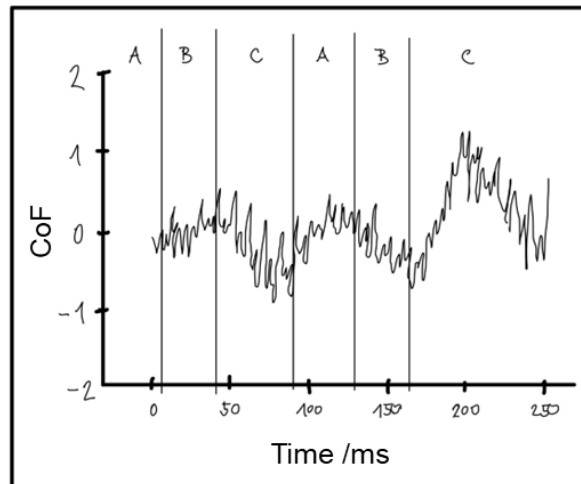
Povrchy vzorků po demineralizaci mají obnaženou krystalovou strukturu (Obr. 2-5: b, e), po čištění však demineralizovaný povrch získá minerální látky pomocí remineralizačních účinků past a sklovina je opět hladší (Obr. 2-5: c, f), i tak náchylnější k opotřebení. Proces remineralizace se potvrdil především u past obsahujících fluoridy a hydroxyapatit, což jsou látky zabraňující vzniku kazu, snižující citlivost zubu a doplňující minerály zubního povrchu.



Obr. 2-5: Povrchy skloviny po čištění (a, d), povrchy skloviny po demineralizaci (b, e), povrchy demineralizované skloviny po čištění (c, f) [21]

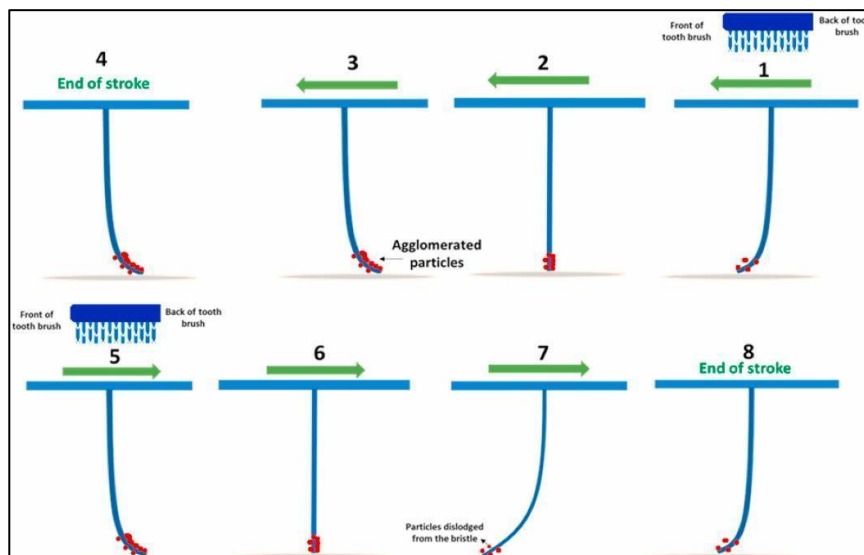
2.6.2 Vliv abrazivních částic na součinitel tření v kontaktu zubního povrchu a kartáčku

V publikaci [22] byl detailně rozebrán časový průběh součinitele tření a vliv abrazivních částic oxidu hlinitého a oxidu křemičitého na tření a opotřebení zubních povrchů. Z publikace bylo potvrzeno, že komplexní pohyb štětín kartáčku při experimentálním čištění vede k poměrně asymetrickému vývoji součinitele tření. Bylo také prokázáno, že prvních 10 minut testování probíhá doba záběhu součinitele tření. Následně dojde k obroušení vrcholů částic a jejich usazení na štětinách kartáčku a průběh součinitele se sníží a ustálí. Na průběh jako takový má vliv poloha kartáčku v dráze pohybu. Vykonaávají kartáček lineárně vratný pohyb (Obr. 2-7), průběh součinitele v čase popisuje sinusová funkce (Obr. 2-6).



Obr. 2-6: Časový průběh součinitele tření [21]

V maximálních hodnotách tření (při obratu kartáčku z jednoho směru na druhý) probíhá v kontaktu mazání mezné, zatímco při lineárním pohybu dochází k mazání smíšenému. Fáze smíšeného mazání je žádoucí pro nižší tření i opotřebení. Na velikost součinitele tření i opotřebení má pak vliv tuhost štětin, která má spojitost se schopností ohybu (Obr. 2-7), tedy s množstvím aglomerovaných částic na konci štětiny. S nižší tuhostí je v kontaktu více částic a tření i opotřebení je vyšší. Současně tyto faktory rostou se zvyšujícím se zatížením.



Obr. 2-7: Detail aglomerace částic na štětinách kartáčku při čištění [22]

2.6.3 Účinnost čištění zubních past

Pan Myneni [20] se kromě vlivu tvrdosti částic na opotřebení zubních povrchů věnoval také účinkům jedlé sody (hydrogenuhličitan sodný) na účinnost čištění zubů. Jedlá soda byla hodně užívaná pro schopnost čištění bez velkých abrazivních účinků. Její výhodou v porovnání s některými inertními abrazivy je biokompatibilita s fluoridem sodným, který posiluje sklovinu. Pokud jsou látky v pastě inertní, omezuje to využití fluoridů, které jsou v pastách žádoucí. Zuby byly čištěny po dobu jednoho měsíce pastou s jedlou sodou s fluoridem a bez něj. Po vyhodnocení bylo zjištěno, že přítomnost jedlé sody zvyšuje účinnost čištění, pasta je schopna se dostat na více míst na ploše zubu a snižuje riziko zánětu díky zmíněné biokompatibilitě. Současně je zde i spojitost s pH, kdy kritická hodnota pH pro zubní povrchy je kolem 5,1-5,5. Pokud hodnota klesne pod tuto úroveň, začíná proces demineralizace. Například po pozření sacharidů se hodnota pH zubů sníží na 4 zhruba na hodinu, než se hodnota vrátí na původní. Pokud je využita pasta s fluoridem, hodnota pH je zvýšena na hodnotu 6,8. V přítomnosti jedlé sody však pH vystoupalo až na 8,3. Kromě vyšší účinnosti je tedy hydrogenuhličitan sodný přínosný i pro remineralizaci zubního povrchu.

V následujících publikacích [22, 23, 24] byly porovnávány účinnosti čištění pro bělicí zubní pasty, do nichž bylo jako abrazivum přidán perlit (75 % SiO₂), uhličitan vápenatý a oxid křemičitý.

První výzkum [23] popisuje měření účinnosti tak, že vzorky skloviny byly máčeny v nealkoholickém nápoji (kávě/čaji/žaludečním mucinu) po dobu 4 dnů pro obarvení povrchu. Vzorky byly poté čištěny 3-4 minuty se zatížením 1,75 N. Úbytek skvrn byl měřen po čištění jako množství intenzity skvrn, které bylo škálováno podle rozsahu skvrn [26]. Pro vyhodnocení abrazivity past byly zuby čištěny po dobu 4 týdnů 2x denně 30 s. Účinnost čištění byla výrazně vyšší pro pastu, do které byl přidán perlit pro bělicí účinky v porovnání s pastou obsahující pouze oxid křemičitý. Současně pasta nevykázala výrazně vyšší míru abraze, pokud uvažujeme rostoucí opotřebení s účinností čištění a může tak být považovaná jako velmi účinná (Tabulka 2-5).

Tabulka 2-5: Porovnání procentuálního množství odstraněného plaku po 400 a 600 cyklech čištění a množství opotřebené skloviny po 4 týdnech čištění [23]

Abrasivum	% Odstraněných skvrn po 400 cyklech (SD)	% Odstraněných skvrn po 600 cyklech (SD)	Opotřebení skloviny v μm po 4 týdnech čištění 2x/denně 30 s
SiO ₂	40,1 (11,5)	47,6 (12,6)	0,088
Bělicí zubní pasta (perlit)	63,8 (11,0)	70,3 (9,3)	0,137

Druhá studie [24] porovnává hodnoty opotřebení a účinnosti čištění pro bělicí zubní pastu s perlitem a uhličitanem vápenatým a pro pasty s abrazivou oxidu křemičitého. Čištění trvalo 20 minut při zatížení 0,5 N a výsledky jsou zobrazeny v Tabulce 2-6 a 2-7. Perlit v kombinaci s uhličitanem vápenatým se jevil opět jako velmi účinné abrazivum z hlediska účinnosti čištění a v porovnání opotřebení (Tabulka 2-7) s užívanými bělicími pastami je zřejmé, že pasta obohacená o perlit nejeví významně vyšší hodnoty opotřebení.

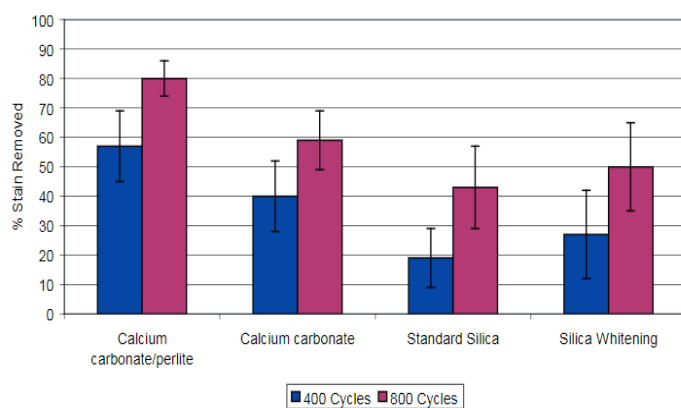
Tabulka 2-6: Porovnání hodnot účinnosti čištění po 400 a 800 cyklech kartáčku [24]

Abrazivum	% Odstraněných skvrn 400 cyklů (SD)	% Odstraněných skvrn 800 cyklů (SD)
Uhličitan vápenatý/perlit	57,25 (12,06)	80,17 (6,33)
Uhličitan vápenatý	40,28 (11,55)	58,58 (9,53)
SiO ₂ /Triklosan	19,13 (10,08)	43,18 (13,58)
Bělicí SiO ₂	26,78 (15,77)	50,43 (15,19)

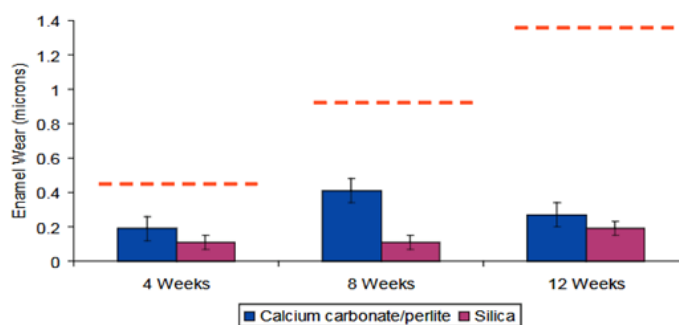
Tabulka 2-7: Porovnání hodnot opotřebení po 400 a 800 cyklech kartáčku

Produkt	Opotřebení skloviny (µm) (SD)	Opotřebení dentinu (µm) (SD)
Bělicí zubní pasta s uhličitanem vápenatým/perlitem	0,08 (0,02)	10,97 (2,15)
Bělicí zubní pasta A	0,14 (0,05)	11,60 (1,57)
Bělicí zubní pasta B	0,14 (0,05)	9,47 (2,57)

Poslední publikace [25] opakuje metodiku pro odhalení účinnosti čištění– nealkoholické nápoje po dobu 4 dnů, měření podle rozsahu intenzity skvrn. Opět byly zkoumány bělicí pasty s perlitem a pasty s abrazivou oxidu křemičitého. Porovnané hodnoty účinnosti čištění po 400 a 800 cyklech můžete vidět na Obr. 2-8 a hodnoty opotřebení pro pastu obohacenou o perlit a pastu s oxidem křemičitým na Obr. 2-9. Obecně lze konstatovat, že přítomnost perlitu je z hlediska efektivity čištění v pastách přínosná a zároveň tím nejsou zvýšeny abrazivní účinky.

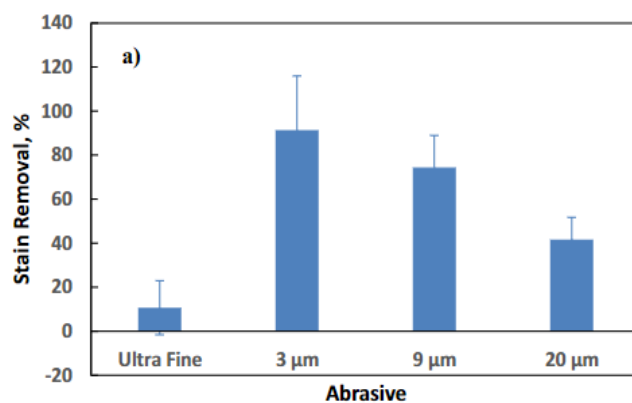


Obr. 2-8: Porovnané účinnosti čištění pro měřená abraziva [25]



Obr. 2-9: Porovnané hodnoty opotřebení pro měřená abraziva [25]

Účinnost čištění zubních povrchů má spojitost také s velikostí abrazivních částic (Obr. 2-10) [27]. Zkoumány byly částice oxidu hlinitého o velikostech 0,5 μm , 3 μm , 9 μm a 20 μm . Na vzorky byla nanesena barviva ve formě kyselin, koloidního železa a síranu. Po nanesení barviv byly vzorky sušeny. Následně proběhlo 10 000 tahů kartáčku při rychlosti 120 tahů/min při zatížení 1,5 N. Po vyhodnocení bylo odhaleno, že existuje kritická velikost částic, pro kterou je množství odstraněných skvrn nejvyšší.



Obr. 2-10: Závislost účinnosti čištění na velikosti částic [27]

Účinnost čištění lze také testovat pomocí úbytku zubního plaku z povrchu zubu po čistícím procesu. Kromě toho špatně odstraněný zubní plak je rizikovým faktorem pro tvorbu bakteriálních infekcí v dutině ústní. Mikrobiální populace zubního biofilmu je usazena v plaku, který je adhezivní k povrchu zubů a zároveň poskytuje ochranu zubního povrchu. Plak je tvořen polysacharidy, lipidy, glukany a proteiny. Pro odstranění plaku je tak nutné narušení jeho struktury.

V současném výzkumu je poměrně problematické nalézt ideální složení zubního biofilmu. Velké množství vzorků je totiž rozpustné ve vodě nebo je výroba příliš komplikovaná. V publikaci [28] bylo cílem vytvořit umělý biofilm s podobnými mechanickými vlastnostmi jako má zubní plak. Biofilm byl v experimentu vytvořen ze dvou polysacharidů – chitosanu a methylcelulózy. Přítomnost chitosanu zvyšuje adhezi a odolnost proti otěru. Pokud je ho ale v biofilmu příliš, je proti otěru moc odolný a biofilm se neporuší. Methylcelulóza se často používá jako stabilizátor pro udržení viskozity. Chitosan obsahuje volné aminoskupiny, a díky tomu je schopen se vázat na methylcelulózu.

Při přípravě plaku byl chitosan rozpuštěn v 100 ml kyseliny octové (2 % hm.) při 60 °C, dále byla přidána methylcelulóza. Následovalo míchání a chlazení roztoku na pokojovou teplotu. Na kulaté vzorky polymethylmethakrylátu (materiálu využívaném pro tvorbu korunek) o obvodu 12,75 mm bylo využito 100 mikro litrů umělého biofilmu, naneseného pipetou a sušeno 16 hod při 45 °C. Dalším krokem byla neutralizace roztokem NaOH po dobu 10 min a oplach vodou. Čistící proces probíhal se zatížením 3 N vodou pro 5,10,15,25 a 45 tahů s frekvencí 2,5 Hz, amplitudou pohybu 10 mm v y-ose, a s frekvencí 0,25 Hz se stejnou amplitudou v x-ose. Po čištění byly všechny vzorky foceny optickým mikroskopem pro vyhodnocení úbytku materiálu pomocí obrazových analýz, kdy byly maskovány plochy po čištění bez plaku na základě limitních hodnot světla. Nakonec byl vyhodnocován procentuální podíl plaku na povrchu vzorku.

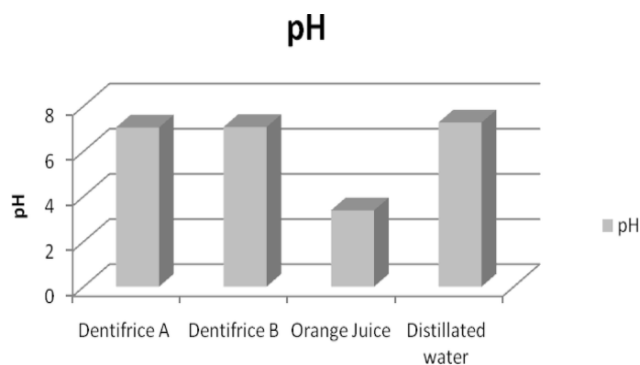
Čím více bylo přítomno methylcelulózy v biofilmu, tím více plaku ubývalo. Současně se zvyšujícím se počtem cyklů se zvyšoval úbytek plaku z povrchu. Pokud methylcelulóza nebyla přítomna vůbec, po 45 tazích nedocházelo k žádnému úbytku plaku. Omezením studie je, že nedošlo k testům se zubními pastami. Nicméně se jedná o biofilm z cenově výhodných a ekologických materiálů, jehož výroba je přívětivou laboratorní metodou [28].

2.6.4 Opotřebení zubních povrchů po čištění dětskými zubními pastami

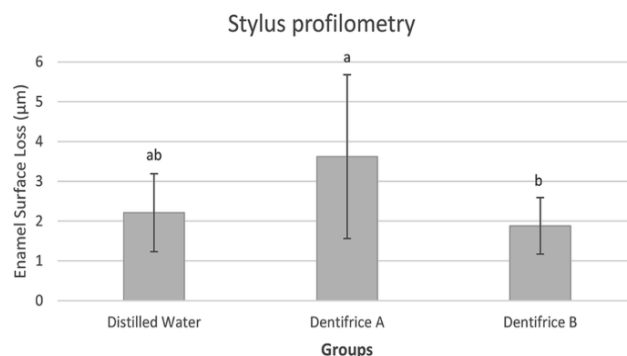
Při zajištění vhodného složení dětských zubních past pro nízký abrazivní účinek se berou v úvahu jiné okolnosti [29]. Je požadováno, aby každá pasta měla dostatečné množství fluoridů pro zabránění vzniku kazu, současně ale nižší množství abraziv, jelikož dětské zuby jsou náchylnější k opotřebení. Důležitou součástí pasty jsou zvlhčovače (sorbitol, glycerol, polyethylenglykol), která zajišťují dodávku fluoridu a do jisté míry i nasládlou chuť pasty. V případě, že dítě pastu využívá rádo, je totiž zvýšen čas čištění společně s účinností fluoridových látek.

V následující publikaci [30] byl proveden výzkum pro srovnání opotřebení erodovaných povrchů zubů po čištění dvěma dětskými zubními pastami (s fluoridem – A, bez fluoridu – B), hodnoty byly porovnány s výsledky opotřebení po čištění destilovanou vodou. Spojitost s opotřebením má opět hodnota pH, která se při erozi mění. Fluorid je látka podporující odolnost skloviny, proto je jeho přítomnost v dětských pastách žádoucí. Vzorky byly v experimentu máčeny 3x denně na 2 minuty v pomerančové šťávě, dále na hodinu uloženy do umělých slin a poté proběhlo 150 tahů kartáčku. Celý cyklus trval 5 dnů a opotřebení bylo měřeno pomocí analýzy na profilometru.

Po změření pomerančová šťáva prokázala svoji kyselost nízkou hodnotou pH (Obr. 2-11), zatímco dětské pasty vykázaly příznivé hodnoty pH. Měřením bylo zjištěno, že přítomnost fluoridů snižuje míru abraze erodovaného zubního povrchu (Obr. 2-12).



Obr. 2-11: Porovnané hodnoty pH obou past, pomerančové šťávy [30]



Obr. 2-12: Výsledné hodnoty opotřebení [30]

2.7 Shrnutí hlavních zjištění

2.7.1 Výplňové materiály

V posledních letech se výzkum a vývoj v oblasti zubních výplní zaměřuje na zlepšení vlastností materiálů pro jejich klinické využití. Široce využívané bývaly kovové materiály, od kterých se však postupně odvrací z důvodů neestetičnosti, toxicity a špatné biokompatibility [6, 8]. Z hlediska estetiky jsou lepší volbou keramické materiály, nicméně se vyznačují vysokou křehkostí [6,7]. Velmi využívanými materiály jsou skloionomerní cementy a kompozitní materiály. Skloionomerní cementy jsou vysoce biokompatibilní a schopné uvolňovat fluoridy, což je žádoucí pro prevenci kazu a zvýšení odolnosti povrchu [9], mají však špatné mechanické vlastnosti kvůli nízké lomové houževnatosti [8]. Kompozitní materiály jsou populární díky své biokompatibilitě, chemické inertnosti a dobré manipulaci, i tak je u těchto materiálů velkým tématem vysoké opotřebení. Největší výhodou je možnost modifikace materiálu změnou plniva a tím dosažení vyšší mechanické pevnosti [6]. Hojně užívané jsou nyní materiály zvané kompomery, kombinující vlastnosti kompozitních pryskyřic a skloionomerních cementů [9]. Ačkoli kompomery vykazují v některých ohledech horší vlastnosti ve srovnání s čistými kompozity, je možné tyto vlastnosti zlepšit přidáním plniva, čímž se zvýší jejich pevnost. Významnou výhodou kompomerů jsou příznivé vlastnosti cementů, jako je uvolňování fluoridů a dobrá adheze k zubním tkáním.

Rešeršní část zaměřená na výplňové materiály byla klíčová pro určení vhodného výplňového materiálu, který bude použit v experimentální části práce. Po podrobném shrnutí a analýze dostupných materiálů bude pro diplomovou práci zvolen jako hlavní třetí povrch kompomerní materiál, z důvodu vhodných mechanických vlastností, biokompatibility a relevantnosti v kontextu současného stomatologického výzkumu.

2.7.2 Zubní pasty, abrazivní částice a jejich vliv na tření a opotřebení zubních povrchů

Schopnost pasty opotřebit dentin určuje hodnota RDA, měřená podle normy ISO 11609, přičemž klinicky přijatelné pasty by neměly překročit dva a půl násobek abrazivity pyrofosforečnanu vápenatého (RDA 250) [12]. V současné chvíli je řešeno složení zubních past tak, aby bylo dosaženo minimálního opotřebení při maximální účinnosti čištění.

Abrazivní látky přítomné v zubních pastách jsou nezbytné pro kvalitní čištění, nicméně způsobují do jisté míry opotřebení zubních povrchů. Vlastnosti abrazivních částic, jako je tvar, tvrdost, velikost, rozložení nebo schopnost shlukování, významně ovlivňují opotřebení zubních povrchů. Z hlediska tvaru bylo prokázáno, že částice sférických tvarů opotřebují méně v porovnání s ostrými hranami částic [18]. Jedlá soda s tvrdostí podobné dentinu, vykazuje nižší opotřebení dentinu než tvrdší oxid křemičitý a oxid hlinitý [20]. V případě velikosti dochází u větších seskupení či větších částic k vyššímu přenosu zatížení a zároveň částice nejsou schopny se zachytit do štětin kartáčku a jsou tak posouvány po povrchu, což zvyšuje míru opotřebení [11, 17]. Díky tomu, že interakce, a tedy i morfologie částic jsou velmi ovlivněny koncentrací, rozložením a schopností shlukování částic, lze říct, že částice využívané v zubních pastách se za různých podmínek chovají odlišně [11]. Mezi používané abrazivní látky patří, fosfáty, uhličitanu a oxidy křemíku, hliníku a zinku, přičemž šetrné zubní pasty by měly obsahovat ideálně 12–15 % nerozpustných brusných látek [12, 29]. Z hlediska opotřebení zubních povrchů ve spojitosti se zubními pastami hrají velkou roli také hodnoty pH zubní pasty, kdy při nižších hodnotách pH jsou hodnoty opotřebení vyšší z důvodů demineralizace skloviny [21].

V případě tření bylo zjištěno [22], že na počátku experimentů simulovaného čištění jsou hodnoty součinitelů vyšší a po obroušení abrazivních částic se hodnota sníží a ustálí. Pohyb kartáčku vede sice k asymetrickému vývoji součinitele tření, v detailu se ale jedná o sinusovou funkci. Smíšené mazání v lineární části pohybu vede k nižším hodnotám tření a opotřebení, naopak při obratu jsou hodnoty vyšší z důvodu mazání mezného. Co se týče kartáčku, nižší tuhost štětin a vyšší zatížení zvyšují tření i opotřebení. V případě tření v kontaktu tribologické soustavy dutiny ústní bylo velmi obtížné nalézt potřebné publikace, proto je třeba navazujících výzkumů.

2.7.3 Účinnost čištění zubních past

V případě účinnosti čištění bylo odhaleno, že jedlá soda v zubních pastách má příznivé účinky jak na účinnost čištění, tak i na udržování příznivých hodnot pH z hlediska opotřebení. Je biokompatibilní s fluoridem, který remineralizuje sklovinu a zajišťuje vyšší odolnost vůči opotřebení [20]. Jako velmi účinně čistící abrazivum se jevil také perlit (75 % SiO₂) [23, 24, 25]. Hodnoty účinnosti čištění pro perlit byly vyšší v porovnání s ostatními abrazivy při zachování stejného nebo nižšího abrazivního účinku. Dále byla potvrzena existence závislosti mezi kritickou velikostí částic a schopností odstranění zubního plaku [27]. Účinnost čištění zubních povrchů je tedy ovlivněna pH zubních povrchů, druhy přítomných abrazivních částic a velikostí částic.

Výzkum umělého zubního biofilmu [28] ukázal, že vhodná kombinace chitosanu a methylcelulózy dostatečně simuluje vlastnosti zubního plaku, což poskytuje cenné informace pro výzkum účinnosti čištění zubních past. V publikaci byla popsána metodika vytváření umělého zubního plaku, která bude využita v diplomové práci. Současně rešeršní část popisuje dvě metody využívané pro vyhodnocení účinnosti čištění zubních povrchů, kterými bude diplomová práce částečně inspirována. Jednalo se o vyhodnocení procentuálního úbytku plaku po čistících intervalech obrazovou analýzou a využití škálování intenzity skvrn obarveného povrchu [22, 24, 26, 27].

2.7.4 Opotřebení zubních povrchů po čištění dětskými zubními pastami

V případě dětských zubních past je důležitá přítomnost fluoridů pro vyšší odolnost zubů, nízké množství abraziv pro minimalizaci opotřebení a nasládlá chuť, která zajistí delší dobu čistícího procesu, tedy i vyšší účinnost remineralizačních látek [29]. Výzkum ukázal, že dětské pasty s přítomnými fluoridy vykazují nižší míru opotřebení ve srovnání s pastami bez fluoridů a zároveň mají příznivé hodnoty pH [30].

V práci budou měřeny dětské zubní gely bez fluoridů, nicméně bylo poměrně problematické nalézt tribologické studie spojené s dětskými zubními pastami. Proto je tento výzkum proveden v zájmu rozšíření současného vědeckého poznání, jelikož se zaměřuje na dosud málo prozkoumanou oblast.

2.8 Mezera v poznání

Ačkoliv byl dosažen významný pokrok v oblasti výplňových materiálů a zubních past, existují stále mezery v porozumění určitých spojitostí. Chybí jak studie na určité tribologické parametry ve spojitosti s dutinou ústní, tak komplexní tribologické studie, které by posoudily vliv vlastností abrazivních částic na tření, opotřebení a účinnost čištění v kontaktu s výplňovými materiály. Většina tribologických studií se totiž zaměřuje na přirozené zubní tkáně, jako jsou dentin a sklovina a nevěnují se výplňovým materiálům. Současně se studie věnují ovlivňujícím faktorům izolovaně, ne však komplexně.

Vliv na tření a opotřebení mají také vlastnosti rozdílných výplňových materiálů, různých typů kartáčků, tvrdost samotných částic nebo pH a chemické složení zubních past. V práci bude pozorovanou veličinou zubní pasta a vliv jejích abrazivních částic na tření, opotřebení a účinnost čištění v kontaktu s výplňovým materiálem. Nicméně, všechny zmíněné faktory by bylo vhodné pozorovat v rámci navazujícího výzkumu. Jako celkový výsledek bude vyhodnocen poměr účinnosti čištění vůči opotřebení, tedy hodnota příznivosti. Práce tak poskytne komplexní výzkum vlivu abrazivních částic v zubních pastách právě na výplňové materiály, který může odhalit zákazníkům, jaké pasty jsou pro ústní hygienu vhodné nebo napovědět výrobcům, jak postupovat při vývoji jejich složení.

3 CÍLE PRÁCE

3.1 Výzkumné otázky

O1: Jaký vliv mají vlastnosti abrazivních částic (tvar, velikost, koncentrace, uspořádání, schopnost shlukování a prvkové složení) v pastách na tření a opotřebení výplňových materiálů?

O2: Existuje závislost účinnosti čištění zubní pasty na vlastnostech abrazivních částic?

O3: Jaké jsou rozdíly v opotřebení zubního výplňového materiálu u klasických komerčních past s rozdílnou hodnotou RDA v porovnání s dětskými zubními pastami?

3.2 Cíle výzkumu

Cílem práce je na základě tribologických experimentů a mikroskopických analýz odhalit vliv vlastností abrazivních částic (velikost, tvar, koncentrace, uspořádání, schopnost shlukování a prvkové složení) na tření, opotřebení a účinnost čištění výplňového materiálu. Následně vyhodnotit spojitost mezi opotřebením a účinností čištění a posoudit příznivost zubních past využívaných ve stomatologii.

Dílčí cíle:

- rešerše zásadních tribologických studií se zaměřením na analýzy vlivu složení a abrazivity zubních past na tření, opotřebení a účinnost čištění zubních výplní,
- návrh podmínek experimentů pro měření součinitele tření, opotřebení a účinnosti čištění v konfiguraci kartáček-zubní výplň na tribometru Bruker UMT TriboLab,
- analýza topografie třecích povrchů zubních výplní před a po simulaci procesu čištění zubů,
- měření součinitele tření a následné vyhodnocení míry opotřebení pro vybrané zubní pasty s různou mírou abrazivity a vybraný materiál zubní výplně,
- vyhodnocení morfologie a vlastností abrazivních částic ve vybraných zubních pastách pomocí SEM analýz a jejich vliv na opotřebení zubních výplní,
- fluorescenční a obrazová analýza úbytku plaku ze zubní výplně (účinnost čištění).

Jedná se o výzkum orientovaný základní, jehož výsledky budou přínosem ve stomatologii pro budoucí vývoj šetrnějších zubních past.

3.3 Hypotézy

H1: Se zvyšující se velikostí abrazivních částic a ostřejšími tvary se schopnost opotřebení povrchu zubů zvyšuje. Pokud jsou částice seskupeny ve větších objemech, tvoří celkově větší velikosti a opotřebení je vyšší, jelikož se zatížení přes částice na povrch zubu přenáší více [11, 17, 28]. Zvyšujícím faktorem opotřebení zubních povrchů je také vyšší koncentrace částic a tvrdost částic [12]. Z hlediska tvrdosti bylo prokázáno, že pokud jsou abraziva tvrdostí podobné dentinu, je míra abraze nižší [20]. U všech zmíněných vlastností předpokládáme, že pro výplňové materiály budou mít vlastnosti abrazivních částic podobné účinky. V případě tření je předpoklad, že průběh součinitele tření díky komplexnímu pohybu štětín kartáčku při čištění povede k poměrně asymetrickému vývoji [22]. V detailu by se ale mělo jednat o sinusovou funkci na základě lineárně vratného pohybu kartáčku. Po přidání roztoku pasty se slinami dojde po určité době k obroušení částic a tím k poklesu a ustálení součinitele tření.

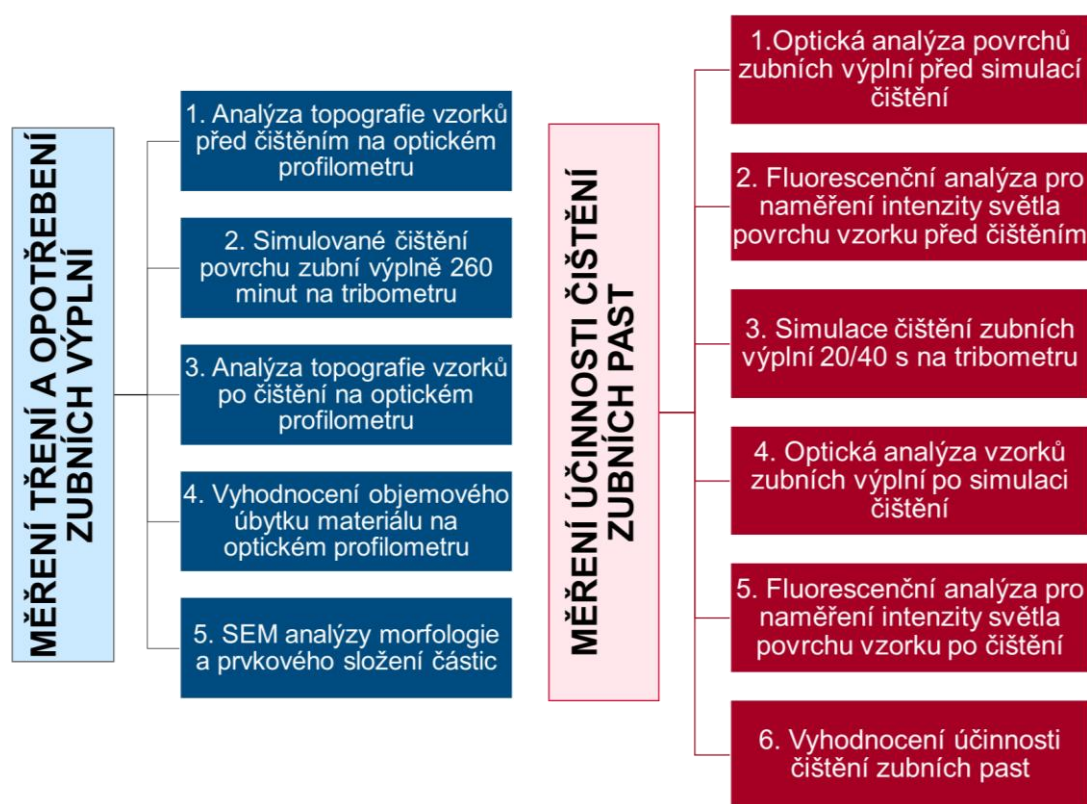
H2: Na základě nerozpustnosti abrazivních částic ve vodě a jejich schopnosti obrousovat povrch výplňového materiálu je předpoklad, že s rostoucím opotřebením výplně poroste účinnost čištění zubních past. Tento předpoklad z části vyvrací publikace, která odhalila, že pro maximální účinnost čištění zubní pasty obohacené o perlit nevyšly maximální hodnoty opotřebení [24]. Účinnost tedy přímo nezávisí na opotřebením, ale také na volbě abrazivních částic [18]. Některé studie prokazují, že přidáním perlitu lze docílit vyšší účinnosti při stejném nebo menším abrazivním účinku [22, 23, 24]. Současně existuje kritická velikost částic, pro kterou jsou hodnoty účinnosti čištění nejvyšší [31]. Druhá hypotéza tedy předpokládá, že by mohla existovat závislost účinnosti čištění na velikosti částic a na přítomných abrazivech.

H3: Předpokladem je nižší míra opotřebení u dětských past, jelikož v rámci větší šetrnosti se přidává do past pro děti méně abrazivních částic [29]. Současně jsou do past přidávány fluoridové složky, které snižují riziko vzniku kazu a zvyšují hodnotu pH erodovaného povrchu, čímž zvyšují odolnost skloviny vůči abrazi [30]. V této práci budou měřeny pasty bez fluoridů, i tak je předpoklad, že pro dětské zubní pasty bude tření a opotřebení vykazovat nižší hodnoty z hlediska šetrnosti pro dětské chrupy.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Metodika

V diplomové práci se jednalo o výzkumný problém relační, kdy byly do vztahu dány vlastnosti abrazivních částic a jejich vliv na průběh součinitele tření (CoF), opotřebení zubních výplňových materiálů po simulovaném čištění a na účinnost čištění vybraných zubních past. V práci byla využita empirická metoda, která se zaměřuje na odhalení vlastností objektu či jevu (abrazivních částic). Jednalo se o práci kvantitativní, ve které jsou ověřeny hypotézy odvozené z rešeršní části práce pomocí prováděných experimentů. Postup řešení je zpracovaný na Obr. 4-1:

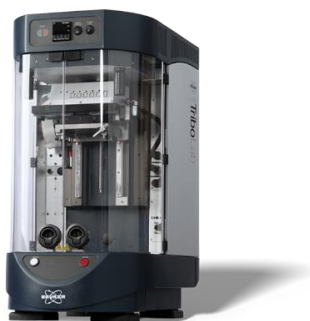


Obr. 4-1: Schéma postupů měření diplomové práce

4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

4.2.1 Tribometr Bruker UMT TriboLab

Jednou z částí měření pro tření, opotřebení a účinnost čištění, je simulace čištění zubního povrchu na zařízení tribometru Bruker UMT TriboLab (Obr. 4-2, Bruker Corporation, USA). Klíčovou vlastností tohoto zařízení jsou vyměnitelné spodní moduly, které umožňují přizpůsobení experimentálních podmínek. V práci byl použit reciproční modul, který umožňuje lineárně vratný pohyb s předem nastavenou amplitudou a frekvencí pro vanu se vzorkem zubní výplně. Horní moduly jsou sondy s citlivými senzory pro záznam kroutícího momentu, působících sil nebo například časového průběhu CoF, který byl v práci vyhodnocován.



Obr. 4-2: Tribometr Bruker UMT TriboLab [32]

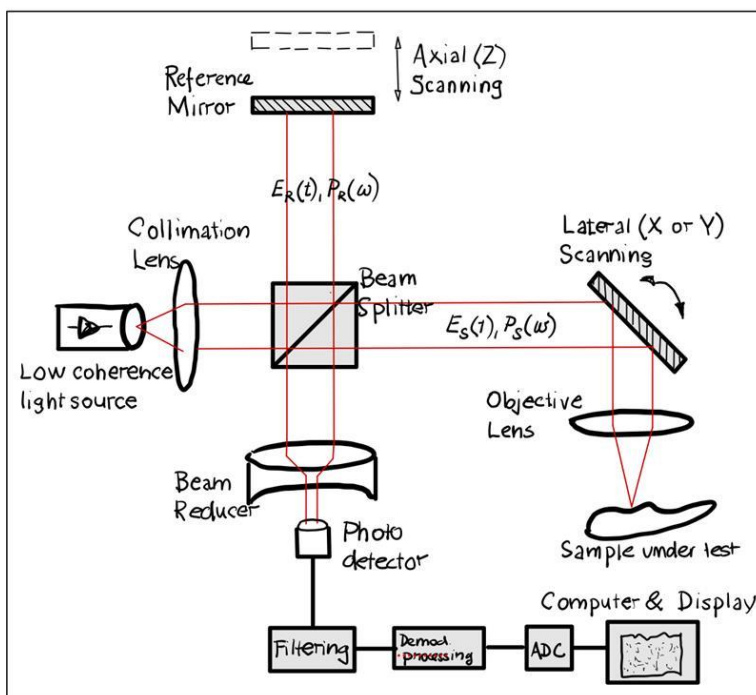
4.2.2 Optický profilometr Contour GT-X Bruker

Pro vyhodnocení objemového úbytku materiálu po čištění byl v práci využíván optický profilometr Contour GT-X Bruker (Obr. 4-3, Bruker Corporation, USA). Zařízení slouží pro bezkontaktní měření povrchu a funguje na principu skenovací interferometrie bílého světla. V horní části je otočný adaptér, na kterém jsou upevněny interferometrické objektivy, zajišťující různé možnosti zvětšení. Díky schopnosti naklápění hlavy, autokalibrační laserové referenci a rozpoznávání vzorku umožňuje profilometr velmi přesnou analýzu povrchu [33, 34]. Vertikální rozlišení zařízení je 0,01 nm. Součástí profilometru je také ovládací software Vision64, díky kterému je možné při vyhodnocení provést rozdíl objemů a vyhodnotit tak požadovaný úbytek.



Obr. 4-3: Optický profilometr Contour GT-X Bruker [33]

Při využití metody skenovací interferometrie vychází světlo ze zdroje a je rozdělovačem rozděleno do dvou svazků (Obr. 4-4). Jeden ze svazků vstupuje do referenčního zrcadla, druhý do objektivu. Paprsky cestují po fyzicky odlišných drahách, následně před vstupem do detektoru interferují. Interference je destruktivní či konstruktivní. Při měření je skenován povrch v interferenčních maximech – tedy při konstruktivní interferenci. Je hledán maximální interferenční kontrast obrazce, který bere program jako funkci, u níž zjišťuje těžiště a tomu je schopen přiřadit výškovou souřadnici [35].

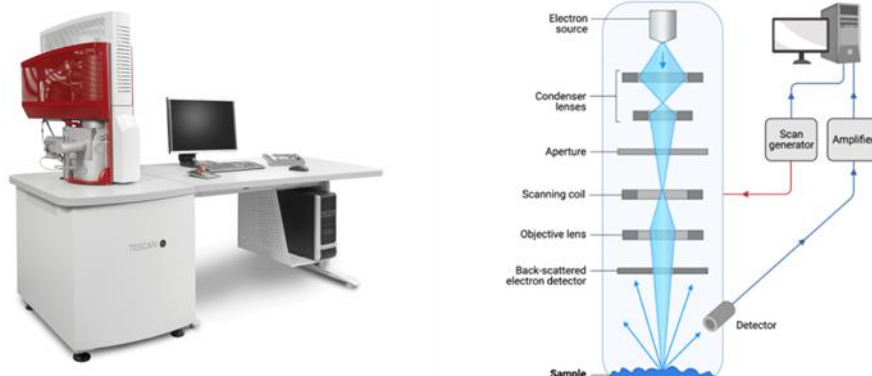


Obr. 4-4: Schéma metody skenovací interferometrie

Díky kompletně naskenované topografii povrchu je možné posléze vyhodnotit objemový úbytek materiálu, maximální hloubky opotřebení nebo provést detailní vyhodnocení drsnosti a vlnitosti povrchu.

4.2.3 Skenovací elektronový mikroskop (SEM) MIRA3 TESCAN

Pro zobrazení abrazivních částic a prvkového složení zubních past byl využit SEM Tescan MIRA3 (Obr. 4-5, Tescan, Česká republika). SEM mikroskopy umožňují zobrazení povrchu v daleko vyšším rozlišení než mikroskopy optické. Elektronový mikroskop využívá svazek elektronů, který emituje ze zdroje. Svazek je zpracován pomocí urychlovacích cívek a clon do stavu, kdy je možné skenovat povrch vzorku (Obr. 4-5). Pro různé rozlišení a zvětšení mikroskopu je při analýzách měněno urychlovací napětí a proud elektronů, určující energii, s jakou elektrony dopadají na vzorek [36].

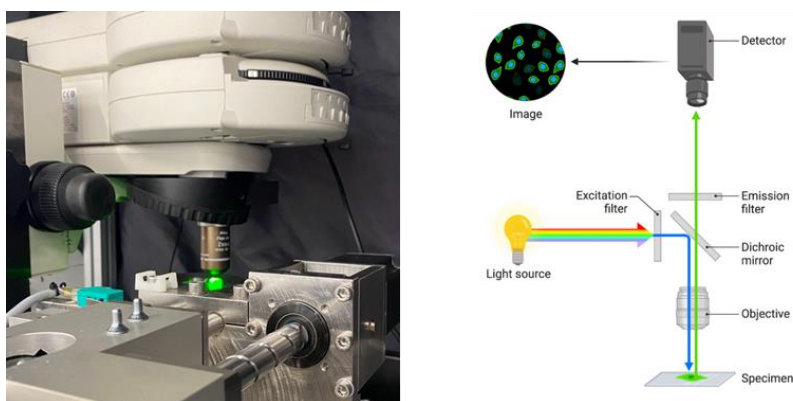


Obr. 4-5: SEM MIRA3 Tescan (CEITEC), schéma principu skenovací elektronové mikroskopie [37]

Pro zobrazení morfologie částic a struktur povrchů jsou využívány SE a BSE (scattered and back scattered electrons) detektory sekundárních a zpětně odražených elektronů. V případě prvkové analýzy jsou využívány EDS (energy dispersive spectrometry) detektory. Ty snímají rentgenové vlny emitované při interakci primárních elektronů svazku s elektrony v obalu atomu. Při interakci dochází k excitaci elektronu a atom je ve stavu energetické nerovnováhy. Zpět do rovnováhy se atom dostane přesunem elektronu z vyšší energetické hladiny do nižší. Tento energetický rozdíl způsobuje emisi rentgenového záření o charakteristické energii. Pro každý prvek se emitované spektrum energie liší a na základě toho je možné provést kvalitativní i kvantitativní prvkovou analýzu [36].

4.2.4 Fluorescenční mikroskop Nikon

Zisk hodnot intenzity světla, emitovaného obarveným zubním plakem z povrchu vzorků výplně, byl možný díky fluorescenčnímu mikroskopu Nikon (Obr. 4-6, Nikon Corporation, Japonsko). Optická soustava tohoto mikroskopu se skládá hned z několika částí (Obr. 4-6). Pro nasvícení fluorescenčního barviva je využíváno zdrojů se světelným spektrem o určité střední vlnové délce. Následně jsou využívány excitační filtry odrážející zdrojové světlo směrem do vzorku. Po emisi světla ze vzorku prochází paprsek zpátky přes objektiv a emisní filtr, opět s určitou střední emisní vlnovou délkou do detektoru, v tomto případě kamery.



Obr. 4-6: Detail fluorescenčního mikroskopu Nikon, schéma principu fluorescenční mikroskopie [38]

4.2.5 Optický mikroskop Nikon

Pro optickou analýzu byl v práci využit optický mikroskop Nikon SMZ800 (Obr. 4-7, Nikon Corporation, Japonsko). V případě optického mikroskopu osvětluje vzorek světelný zdroj soustředěný kondenzorem. Světlo pak prochází vzorkem a vstupuje do objektivu, který díky čočkám vytváří zvětšený obraz (Obr. 4-7).



Obr. 4-7: Optický mikroskop Nikon, schéma principu optického mikroskopu [39]

4.3 Materiál a testovací podmínky

Následující kapitola je rozdělena do tří podkapitol týkajících se výroby materiálů vzorků pro všechny experimenty a následně dvou zmíněných metodik (experimentů pro vyhodnocení vlivů vlastností abrazivních částic na tření a opotřebení a experimentů pro vyhodnocení účinnosti čištění zubních past).

4.3.1 Výplňové materiály pro vzorky zubních výplní

Vzorky zubních výplní o rozměrech 9.5 x 9.5 x 3 mm (Obr. 4-8 a)) byly vyráběny metodou vrstvení a vytvrzování pomocí dentální polymerační LED UV lampy (Ledex WL 090, Woodpecker, Čína, Obr. 4-8 b)). Každá z vrstev byla po nanesení vytvrzena po dobu 20 s. Materiály byly vrstveny do silikonových forem vytvářených přímo pro vzorky o daných rozměrech. Tělo vzorků bylo vyrobeno z nanokompozitního materiálu Filtek Ultimate 3920 A1B (3 vrstvy, 3M, USA) a třecí vrstvu vzorků tvořil světlem tuhnoucí kompomerní materiál Dyract Flow Shade A2 (Dentsply Sirona, USA, Obr. 4-8 c)). Materiál byl zvolen na základě rešeršní části (2.7.1), přičemž jeho velkou výhodou při výrobě byla nižší viskozita umožňující lepší zatečení do formy.



Obr. 4-8: Vzorek zubní výplně (a), UV lampa Ledex WL 090 (b), kompomerní materiál Dyract Flow Shade A2 (c) [40, 41]

4.3.2 Experimenty pro vyhodnocení vlivů vlastností abrazivních částic na tření a opotřebení

Vybrané zubní pasty a kartáčky

Pro tribologické experimenty simulovaného čištění v případě vyhodnocení míry opotřebení byly využity 4 komerční zubní pasty pro dospělé a dva dětské zubní gely (Obr. 4-9). Jako referenční měření proběhlo měření s umělými slinami (US). V případě opotřebení bylo tedy provedeno celkem sedm sad měření, přičemž každá sada byla třikrát opakována pro zajištění reprodukovatelnosti. Vybrané pasty měly odlišnou míru RDA za účelem pozorování odlišné míry opotřebení.



Obr. 4-9: Použité zubní pasty [42–47]

Kontaktní dvojice byla tvořena výplňovým materiálem a kartáčkem Curaprox 5460 Ultra Soft (Obr. 4-10). Tento typ kartáčku byl zvolen pro všechny experimenty. Jeden kartáček byl vždy použit pro jeden experiment (tedy pro 7 sad opotřebení, kdy každá sada měla 3 vzorky, 21 kartáčků, viz Tabulka 4-1).



Obr. 4-10: Kartáček Curaprox 5480 Ultra Soft [48]

V tabulce níže je uveden zubní kartáček použitý při experimentech, vybrané výplňové materiály, zubní pasty s hodnotami RDA a počty využitých materiálů.

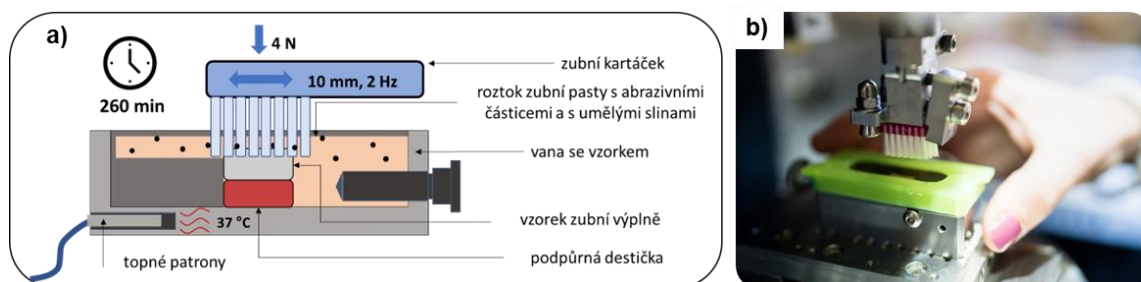
Tabulka 4-1: Prvky tribologické soustavy pro měření opotřebení

Kartáček	Výplňový materiál	Roztok	Počet kartáčků/ počet vzorků	RDA
Curaprox 5460 Ultra Soft	Dyract Flow Shade A2 (povrch) Filtek Ultimate 3920 A1B (tělo: 2-3 vrstvy)	Umělé sliny (US)		0
		Zubní gel Benjamínek + US	3/3	-
		Zubní gel Weleda + US	3/3	15
		Elmex Sensitive + US	3/3	30
		Herbadent + US	3/3	38
		Sensodyne Extra Fresh Repair and Protect (EFRP) + US	3/3	85
		Colgate Total Whitening (TW) + US	3/3	142
		Stejný typ kartáčků i vzorků pro všechny experimenty tření a opotřebení	6 roztoků slin se zubní pastou, 1 x referenční měření pouze s US	

Podmínky pro tribometr Bruker UMT TriboLab

Simulované čištění bylo provedeno na tribometru Bruker UMT TriboLab (Obr. 4-2). Při vyhodnocování tření a opotřebení snímače tribometru v horní části zaznamenávaly normálové a třecí síly, z nichž byl v průběhu času zaznamenáván CoF. Pro experimenty byl nakonfigurován reciproční modul v dolní části tribometru, do kterého byl upnut vzorek zubní výplně, s délkou dráhy 10 mm a frekvencí 2 Hz, aby byl zajištěn pohyb kartáčku přes celý povrch vzorku. Zubní kartáček byl upevněn staticky nad vzorkem (Obr. 4-11 b)) a na základě předchozích experimentálních studií [49] bylo na výplň během čištění aplikováno zatížení kartáčkem 4 N. Manuální zubní kartáčky obvykle působí upínací silou kolem 2,5 N [50], pro dosažení výraznějšího opotřebení byla však zvolena hodnota 4 N. Během experimentu byl vzorek výplně upevněn v držáku pomocí upínacího šroubu na podpůrné destičce, aby byl zajištěn kontakt mezi vzorkem a zubním kartáčkem (Obr. 4-11 a)).

Vana byla na počátku experimentu naplněna roztokem slin se zubní pastou (1 g zubní pasty a 5 ml slin) a současně byla při simulaci vyhřívána na 37 °C pomocí dvou topných patronů vložených do držáku (Obr. 4-11 a)). Roztok zubní pasty se slinami (nebo pouze sliny při referenčním měření) byl do vany přidán na začátku i uprostřed každého experimentu (ve 130. minutě, viz níže). Po celou dobu experimentu byly okraje vzorku zubní výplně kryté pro stanovení referenčních hladin, které později hrály důležitou roli při vyhodnocování opotřebení (4.4.1).



Obr. 4-11: Kontaktní dvojice s roztokem US a vybranou zubní pastou (a), reálná tribologická soustava (b)

Podmínky pro čas experimentů v případě měření tření a opotřebení byly inspirovány studií [50], kde bylo vytvořeno 72 zubních povrchů, které odpovídaly povrchům 28 zubů v dutině ústní. Studie uvažovala denní ústní hygienu 6 minut (2 x denně tři minuty), což odpovídá čištění jednoho povrchu zubu 5 sekund denně (1).

$$\frac{360 \text{ s}}{72 \text{ zubních povrchů}} = 5 \text{ s pro každý zubní povrch denně} \quad (1)$$

$$45 \text{ dnů} * 6 \text{ min} = 270 \text{ minut} \quad (2)$$

Výměna zubního kartáčku by měla ideálně proběhnout po 45 dnech jeho používání, proto byla ve studii volena délka experimentu pro jeden kartáček 270 minut (2).

Pro experimenty simulovaného čištění této diplomové práce byl v jeden okamžik měřen vždy pouze jeden povrch zubní výplně, přičemž vzorový povrch výplně představoval přibližně jeden povrch zubu. Hodnota 260 minut odpovídá době čištění jednoho povrchu zubu za 8,5 roku při denním kontaktu zubního kartáčku s jedním povrchem zubu po dobu 5 sekund (3) [49, 51].

$$\frac{5 \text{ s} * 365 \text{ dní} * 8,5 \text{ let}}{60 \text{ s}} = 258,5 \text{ minut (povrch 1 zubu/ 8,5 let)} \quad (3)$$

Doba čištění vycházela z publikací, zároveň ale bylo nutné čistit výplně poměrně dlouhou dobu, aby bylo opotřebení kvantifikovatelné. Zvolené podmínky tribometru zobrazuje Tabulka 4-2.

Tabulka 4-2: Podmínky pro simulaci čištění na tribometru pro vyhodnocení opotřebení

Zatížení [N]	Frekvence [Hz]	Interval měření [min]	Teplota [°C]	Dráha posuvu [mm]
4	2	260	37	10

Podmínky pro měření na optickém profilometru Bruker GT-X

Objemová ztráta materiálu byla stanovena pomocí optického profilometru Bruker GT-X (Bruker Corporation, USA) na základě vertikální skenovací interferometrie (VSI, 4.2.2). Výška povrchu byla určena detekcí snímku s maximální interferencí. Pro měření byl zvolen objektiv s pětinasobným zvětšením. Celý vzorek byl skenován metodou stitching v rozsahu 10 x 10 mm, která vzorek skenovala po 48 částech a následně sestavila topografii povrchu jako celek. Skenováno bylo do hloubky 100 μm a bylo využito bílé světlo. Vzorek byl skenován před čištěním a po čištění pro následující vyhodnocení rozdílu objemu. Další podmínky v nastavení měření jsou závislé na volbě materiálu a jeho odrazivosti.

Materiál a podmínky pro SE mikroskop Tescan MIRA3

Vzorky past pro měření na SEM bylo nutné nadávkovat do zkumavek a zalít vodou v objemovém poměru 1:3 (Obr. 4-12 b)). Následně byly zkumavky ručně míchány po dobu přibližně 10 minut, aby bylo zajištěno optimální rozpuštění pasty ve vodě. Hlavní myšlenka postupu byla rozpuštění aditiv (polymery, nízkomolekulární látky atd.) ve vodě, zatímco abrazivní složky zůstanou nerozpuštěné. Po částečném rozpuštění bylo dosaženo suspenze, která byla následně odstředěna (13,5 ot. /min, MicroStar12, VWR, USA) po dobu 5 minut (Obr 4-12 a)). Postup centrifugace (odstředění) byl 4x opakován.



Obr. 4-12: Umístění vzorků v centrifuze MicroStar13 (a); vzorky zubních past ve zkumavkách po 2. centrifugaci (b): Elmex sensitive, Sensodyne EFRP, Colgate TW, Benjamínek, Weleda; vzorky na uhlíkových páskách pokryté zlatem (c)

Během odstředění se spolu s anorganickými částicemi usadily také polymerní složky, byla tak vytvořena vodná suspenze, ponechána k usazování za laboratorní teploty. Usazená část byla vysušena a výsledná sušina byla umístěna na terčík s uhlíkovou páskou. Po přípravě byly povrchy vzorků potaženy 15 nm vrstvou zlata (Obr. 4-12 c)) pomocí přístroje EM ACE 600 (Leica Microsystems, Wetzlar, Německo). Morfologie částic zubních past byly zkoumány pomocí SEM MIRA3 (Tescan, Česká republika). Všechna pozorování byla prováděna v režimu zpětně odražených elektronů při urychlovacím napětí 10 kV. Režim skenování byl nastaven na DEPTH a proud svazku byl nastaven na 10pA. Pracovní vzdálenost byla nastavena na 15 mm.

4.3.3 Experimenty pro měření účinnosti čištění zubních past

Vybrané zubní pasty a kartáčky

Pro tribologické experimenty simulovaného čištění v případě vyhodnocení účinnosti čištění byly zvoleny 3 komerční zubní pasty pro dospělé a dva dětské zubní gely (Obr. 4-13, specifikováno v rámci projektu CZ.01.01.01/05/23_009/0004317 - aplikační partner Nobilis Tilia). V experimentech účinnosti čištění v porovnání s experimenty opotřebení byla vynechána zubní pasta Elmex a nebylo prováděno měření s US. Bylo tedy provedeno celkem 5 sad měření, přičemž každá sada byla opět třikrát opakována pro zajištění reprodukovatelnosti. Vybrané pasty měly opět odlišnou míru RDA.



Obr. 4-13: Použité zubní pasty [42, 43, 44, 46, 47]

Kontaktní dvojici tvořil stejný typ kartáčku i zubní výplně a vybraný typ kartáčku byl opět zvolen pro všechny experimenty. Časové intervaly čištění byly při experimentech účinnosti čištění mnohem kratší, proto byl kartáček měněn až po změření všech třech vzorků pro konkrétní zubní pastu (v případě účinnosti čištění tedy využito 5 kartáčků pro 5 zubních past). V Tabulce 4-3 jsou uvedeny prvky tribologické soustavy spolu s počty využitých materiálů.

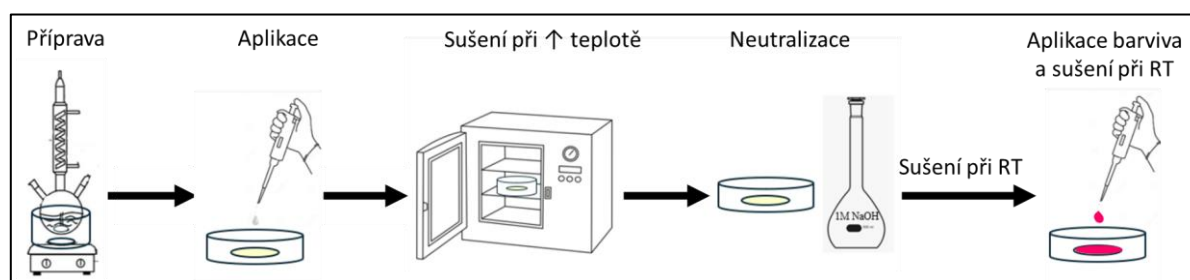
Tabulka 4-3: Prvky tribologické soustavy pro měření účinnosti čištění

Kartáček	Výplňový materiál	Roztok	Počet kartáčků/ počet vzorků	RDA
Curaprox 5460 Ultra Soft	Dyract Flow Shade A2 (povrch), Filtek Ultimate 3920 A1B (tělo: 2-3 vrstvy)	Zubní gel Benjamínek + US	1/3	-
		Zubní gel Weleda + US	1/3	15
		Herbadent + US	1/3	38
		Sensodyne EFRP + US	1/3	85
		Colgate TW + US	1/3	142
Stejný typ kartáčků i vzorků pro všechny experimenty účinnosti čištění		5 roztoků slin se zubní pastou	5 kartáčků 15 vzorků	

Pro měření byly využity vytvořené vzorky zubních výplní (4.3.1), nicméně k vyhodnocení účinnosti čištění všech zubních past bylo nutné na vzorky pro tyto experimenty ještě nanést umělý zubní plak obarvený barvivem.

Příprava a nanášení umělého zubního plaku na vzorky zubních výplní

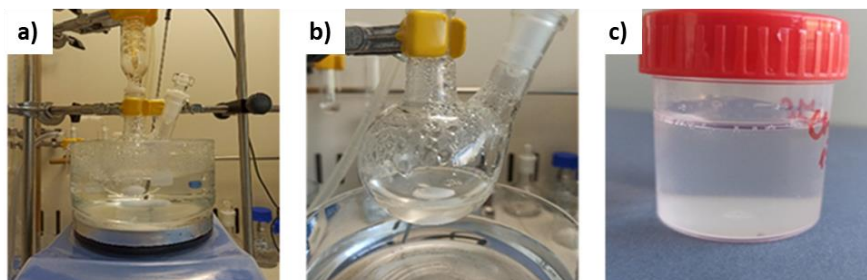
Příprava a nanášení umělého zubního plaku na vzorky zubních výplní a jejich následné značení barvivem bylo provedeno ve spolupráci s výzkumnou skupinou Pokročilých biomateriálů, CEITEC VUT, a to v následujících krocích:



Obr. 4-14: Postup přípravy umělého zubního plaku na bázi 2 typů polysacharidů [Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT]

Příprava umělého zubního plaku na bázi dvou typů polysacharidů

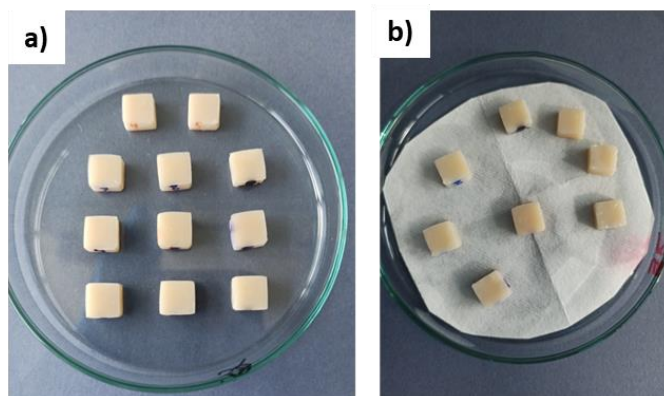
Postup pro přípravu umělého zubního plaku byl optimalizován na základě podkladů z již zmiňované studie [28] věnované novým typům umělých biofilmů pro povrchy zubních protéz. Tímto upraveným postupem byl syntetizován umělý zubní plak na bázi dvou typů polysacharidů v roztoku kyseliny octové při teplotě 60 °C po dobu 6 hodin v aparatuře pod refluxem (Obr. 4-15 a)). Připravený umělý zubní plak byl ve formě transparentního hydrogelu s mírným zákalem (Obr. 4-15 b), c)).



Obr. 4-15: Příprava umělého zubního plaku: aparatura pro přípravu umělého zubního plaku (a), reaktor s připraveným umělým zubním plakem (b), výsledný zubní plak (c) [Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT]

Aplikace umělého zubního plaku na vzorky zubních výplní

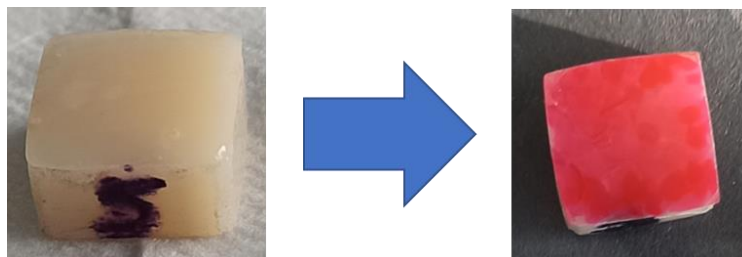
Dané množství umělého zubního plaku bylo nanášeno na vzorky zubních výplní (Obr. 4-16 a)). Následně byly vzorky sušeny při zvýšené teplotě, a poté ve dvou krocích neutralizovány. Po neutralizaci proběhlo 24 hodin sušení při laboratorní teplotě do finální podoby (Obr. 4-16 b))



Obr. 4-16: Vzorky zubních výplní před nanesením plaku (a), aplikovaný umělý zubní plak (b) [Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT]

Aplikace barviva na umělý zubní plak

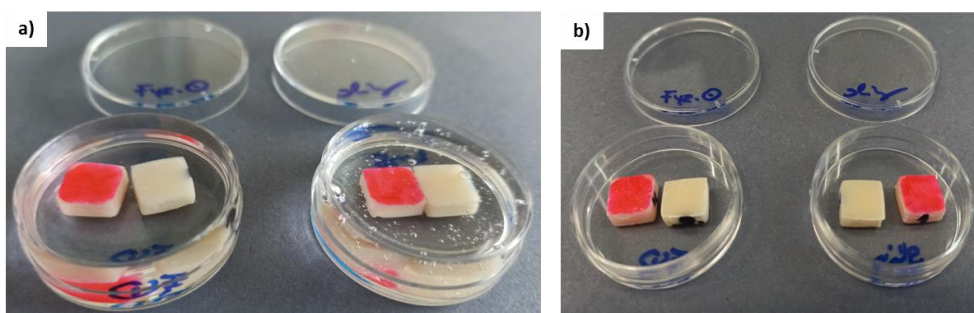
Na vzorky zubních výplní s umělým zubním plakem bylo dále naneseno definované množství 3% SPEICOPLAQUE barviva pro fluorescenční analýzy účinnosti čištění, obsahující fluorescenční složku erythrosin (E 127). Po značení barvivem byly vzorky opět sušeny 24 hodin při laboratorní teplotě. Finální vzhled vzorků zubních výplní s naneseným umělým zubním plakem značených barvivem je zobrazen na Obr. 4-17. Takto připravené vzorky byly předány k tribologickému testování.



Obr. 4-17: Vzorek s naneseným zubním plakem → nanesené 3% SPEICOPLAQUE barvivo [Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT]

Sledování stability umělého zubního plaku ve fyziologických podmínkách

V rámci optimalizace přípravy umělého zubního plaku byla sledována stabilita a adheze plaku aplikovaného na vzorky zubních výplní. Během tribologických testů bylo totiž nutné, aby se umělý zubní plak a nanesené barvivo nerozpouštělo při simulovaném čištění ve slinách se zubní pastou. Měření probíhalo ve fyziologických podmínkách při teplotě 37 °C po dobu 2 hodin (délka testování nastavena na základě tribologických testů). Pro sledování stability byly použity dva typy médií, fyziologický roztok a US (Obr. 4-18 a)). Stabilita byla měřena jak u vzorků bez značení, tak u vzorků umělého plaku značeného barvivem 3% SPEICOPLAQUE. Na základě výsledků měření bylo zjištěno, že značený i neznačený umělý zubní plak byl po celou dobu měření v obou typech médií stabilní, tedy adheze k povrchu zubních výplní byla příznivá a plak se z povrchu neodlupoval (Obr. 4-18 b)).



Obr. 4-18: Stabilitní studie ve fyziologickém roztoku a US: vzorky zubních výplní s umělým zubním plakem v médiu na začátku měření (a, vlevo fyziologický roztok, vpravo US), vzorky zubních výplní s umělým zubním plakem po 2 hodinách měření (b, vlevo fyziologický roztok, vpravo US) [Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT]

Podmínky pro tribometr Bruker UMT TriboLab

V případě účinnosti čištění již nebyl vyhodnocován CoF. Délka dráhy a frekvence recipročního modulu byla stejná jako v předchozí části metodiky (4.3.2). Upínání kartáčku i vzorku proběhlo stejným způsobem, ale byly nově nastaveny podmínky pro časové intervaly a zatížení.

Během vývoje nové metodiky probíhalo testování a optimalizace experimentálních podmínek tak, aby zatížení nebylo příliš vysoké a čas příliš dlouhý. Cílem bylo optimalizovat podmínky tak, aby docházelo k postupnému úbytku plaku z povrchu zubní výplně a tím zajistit, aby obarvený umělý zubní plak nebyl mechanicky odstraněn během prvních pár vteřin experimentu. Po více iteracích bylo zatížení zvoleno offsetovou hodnotou od nulové hladiny kontaktu kartáčku se vzorkem výplně, a to na 0.2 mm (odpovídalo 4 N) a časový interval 20 s. Pokud nedocházelo k výraznému odstranění plaku, po první minutě byly intervaly prodlouženy na 40 s (Tabulka 4-4).

Vana se vzorkem byla opět vyhřívána na 37 °C a roztok obsahoval stejné množství pasty a US jako v předchozí kapitole (4.3.2). Pro každou pastu byly měřeny tři vzorky, jedna dávka roztoku byla vždy využita pro 1 interval čištění třech vzorků identické zubní pasty (jeden roztok byl tedy využit na 3 x 20/40s měření). Každý vzorek zubní výplně pokrytý označeným plakem byl testován po uvedených časových intervalech tak dlouho, než došlo k úplnému odstranění zubního plaku z povrchu zubní výplně. Konkrétní počet časových intervalů se lišil podle schopnosti konkrétní pasty plak odstranit.

Tabulka 4-4: Podmínky pro simulaci čištění na tribometru pro vyhodnocení účinnosti čištění

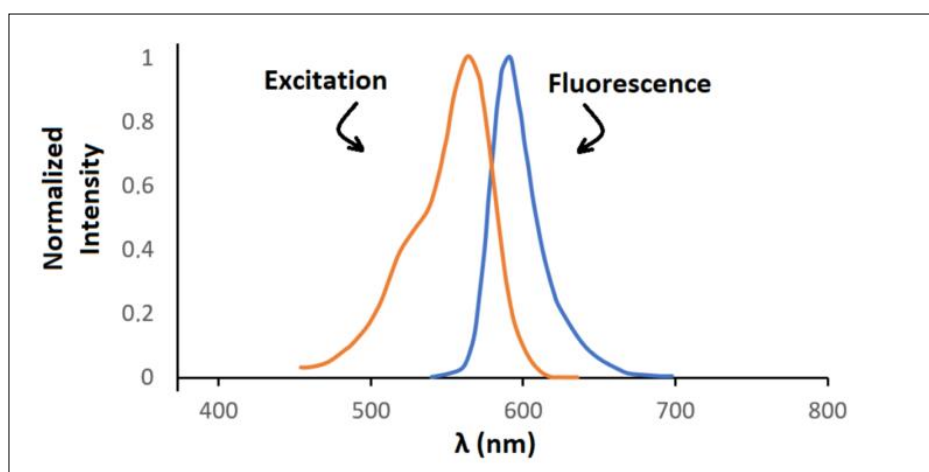
Offset [mm]/ Zatížení [N]	Frekvence [Hz]	Interval měření [s]	Teplota [°C]	Dráha posuvu [mm]
4	2	20/40	37	10

Podmínky pro měření na optickém mikroskopu Nikon

Optická analýza vzorků byla provedena na Mikroskopu Nikon SMZ800 a proběhla vždy před experimentem a po každém intervalu čištění. Analýza sloužila pro přehledné zobrazení úbytku plaku a pro následovné vyhodnocení účinnosti čištění zubních past analýzou obrazu a diskusí. Při experimentech bylo zvoleno zvětšení x10.

Podmínky pro měření na fluorescenčním mikroskopu Nikon

Analýza na fluorescenčním mikroskopu Nikon proběhla pro získání hodnot intenzit světla emitovaného obarveným zubním plakem z povrchu vzorků výplní. Analýza proběhla pro každý vzorek před experimentem a po každém intervalu čištění. Výsledky byly využity pro vyhodnocení úbytku intenzity světla v čase a následně pro vyhodnocení účinnosti čištění zubních past. Pro možnost využití fluorescenční mikroskopie bylo na plak nanášeno podle výše zmíněné metodiky barvivo 3% SPEICOPLAQUE, obsahující fluorescenční složku erythrosin (E 127). Jedná se o červené, ve vodě rozpustné barvivo, jehož absorpční spektrum je v rozmezí 460–570 nm a emisní vlnová délka kolem hodnoty 580 nm. Pro nasvícení fluorescenčního barviva v umělém zubním plaku byl tedy použit světelný LED zdroj MINTL5 se světelným spektrem o střední vlnové délce 554 nm. Paprsek poté putoval do excitačního filtru TRITC, který odráží zdrojové světlo směrem do vzorku. Zvolený filtr měl střední excitační vlnovou délku kolem hodnoty 555 nm (Obr. 4-19) a propouštěl paprsek dále do objektivu. Pro zkoumání problému byl použit objektiv s dvojnásobným zvětšením a po emisi světla z plaku paprsek putoval zpět přes objektiv a emisní filtr do kamery. Využitý filtr TRITC má emisní maximum vlnové délky filtru kolem 576 nm (Obr. 4-19), to odpovídá emisní vlnové délce zvoleného barviva, pro které byl filtr specificky zvolen.



Obr. 4-19: Excitační a emisní spektra vlnových délek filtru TRITC [53]

4.4 Metody

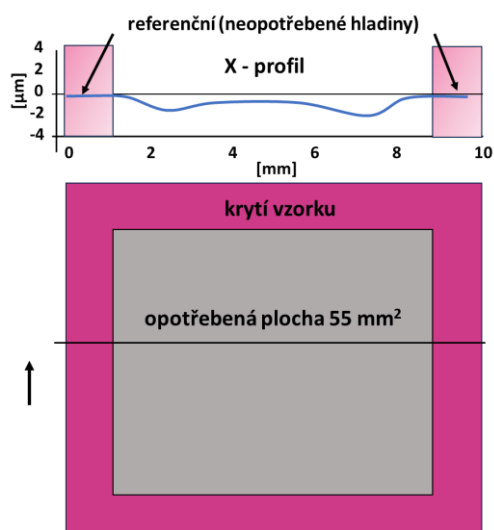
4.4.1 Analýzy vlivu vlastností abrazivních částic na tření a opotřebení zubních výplní

Analýza a vyhodnocení součinitele tření (CoF)

Z každé simulace čištění byl z tribometru získán časový průběh CoF, který byl pro přehlednější grafické vyhodnocení dvakrát filtrován. První filtrování bylo provedeno v programu UMT Viewer, kde byla uložena data přímo z tribometru. Každý soubor byl poté exportován do formátu CSV a druhé filtrování spolu s vykreslením grafů proběhlo v programu Excel. Jak již bylo zmíněno v metodice (4.3.2), pro každou pastu bylo měření opakováno 3x s tím, že bylo měřeno 6 past a jedno referenční měření s US. Celkově bylo naměřeno 21 časových průběhů CoF, přičemž každé tři průběhy dané pasty byly zprůměrovány do jednoho průběhu, finálním výsledkem bylo tedy 7 časových průběhů CoF. Pro detailnější analýzy proběhlo následně vyhodnocení CoF v počáteční, střední a konečné fázi každého ze sedmi časových průběhů.

Analýza a vyhodnocení objemového úbytku materiálu

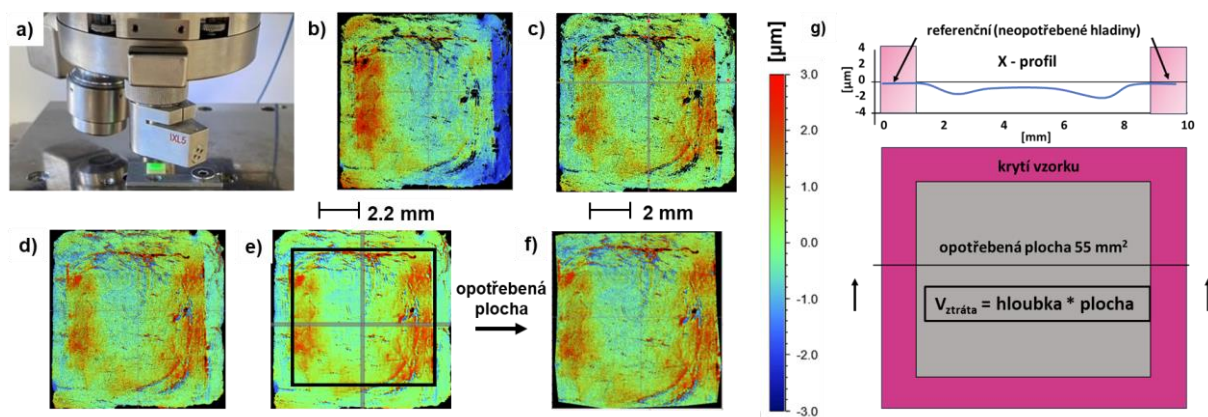
Při simulacích čištění byly vzorky upevněny přítlačným šroubem ve vaně na podložce a zality roztokem zubních past s US (podmínky experimentu viz kapitola 4.3.2). V polovině experimentu byla do vany přidána druhá sada roztoku (1 g zubní pasty a 5 ml US/ 6 ml US v případě referenčního měření). Pro vyhodnocení objemového úbytku bylo nutné, aby krajní části vzorků byly po dobu čištění kryty pro získání referenčních hladin, od kterých byl posléze odečítán objemový úbytek (Obr. 4-20).



Obr. 4-20: Krytí vzorku při simulovaném čištění pro získání referenčních hladin vzorku s detailem řezu a viditelnými rýhami opotřebení

Objemový úbytek zubních výplní byl měřen pomocí metody hloubky řezu. Před každou simulací čištění byl vzorek výplně skenován na optickém profilometru. Následovala simulace čištění, po které byl vzorek opět analyzován na optickém profilometru (Obr. 4-21 a)). Jakmile byly topografie vzorků před a po čištění naskenovány, bylo nutné provést jejich zarovnání v programu Vision 64 a následně odečíst od nulových (referenčních) hladin. Přesnější zarovnání vzorků zajistilo manuální nastavení v programu přes *fiducial points* (pro přesné zarovnání byly vybrány body na povrchu vzorků před a po simulaci čištění ve stejných místech vzorku).

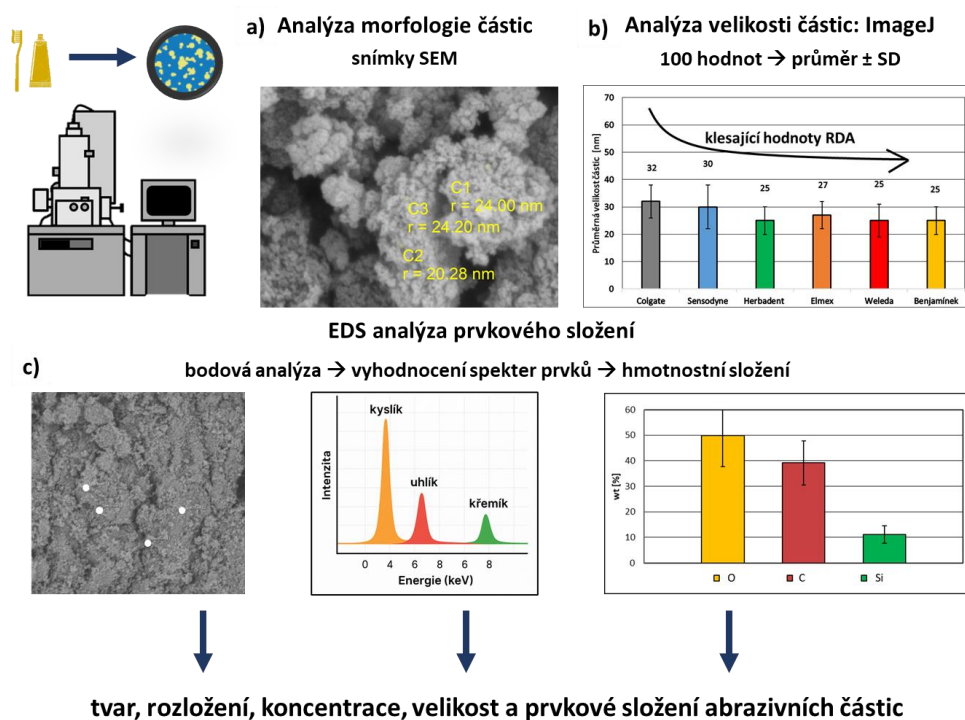
U odečteného povrchu byl pak odstraněn šum pomocí funkce *Mask Data* (Obr 4-21 b)). Dalším krokem bylo odstranění povrchu pomocí funkce *Terms removal*, při kterém byl opotřebovaný povrch maskován. Došlo tedy k vyrovnání povrchu (Obr. 4-21 c)) s odmaskovanými referenčními hladinami. Tyto neopotřebované plochy určily nulovou hladinu vzorku, na základě které byl vzorek vyrovnán. Po vyrovnání povrchu bylo nepřesné skenování (reprezentované černými plochami) dopočteno funkcí *Data restore* (Obr. 4-21 d)). Tato funkce zprůměrovala okolní hodnoty nenaskenovaných míst a dopočítala chybějící hodnoty. Zlepšení vizualizace povrchu zajistil *Gaussův filtr* vyhlazující povrch, přičemž pásmo vlnové délky bylo upraveno na základě drsnosti povrchu (Obr. 4-21 e)). Pro vyhodnocení objemového úbytku pak byly maskovány plochy referenčních hladin, aby k vyhodnocení došlo pouze z opotřebované části (Obr. 4-21 f, g)). Objemová ztráta byla vyhodnocena pro plochu povrchu $55 \pm 2 \text{ mm}^2$ pomocí softwaru Vision 64, kterou program vyhodnocoval jako součin plochy povrchu a hloubky opotřebování (Obr. 4-21 g)).



Obr. 4-21: Skenovaný vzorek na optickém profilometru (a), povrch vzorku po odstranění šumu funkcí *Mask Data* (b), vyrovnání povrchu vzorku funkcí *Terms removal* (c), *Data restore* funkce pro dopočet chybějících hodnot (d), vyhlazení Gaussovým filtrem (e), maskování neopotřebované plochy (f), plastové krytí vzorku opotřebované plochy s detaily opotřebování v x – řezu (g)

Analýza morfologie abrazivních částic a prvková analýza pomocí SEM

Morfologie abrazivních částic (tvar, koncentrace, rozložení) byly posuzovány ze snímků SEM při zvětšení 200kx (Obr. 4-22 a)). Velikosti abrazivních částic byly vypočteny pomocí softwaru ImageJ ze snímků SEM pořízených při zvětšení 200kx a zprůměrovány ze 100 hodnot pro každou zubní pastu (Obr. 4-22 a, b)). Povrchová prvková analýza pak byla provedena pomocí EDS detektoru analýzami 3 až 4 bodů snímku a vyhodnocena pomocí softwaru Aztec 2.1, který odhalil přítomnost abraziv v pastách prostřednictvím hmotnostních procent příslušných prvků. Měření bylo provedeno jako vyhodnocení energetického spektra emitovaných fotonů, kde charakteristický energetický pík odpovídal konkrétnímu prvku (Obr. 4-22 c)) [54]. Kvantitativní analýza dále určila typy abraziv přítomných v pastách na základě hmotnostního složení. Celkově jsme tedy zmíněnými analýzami byli schopni vyhodnotit tvar, rozložení, koncentraci, velikost a prvkové složení abrazivních částic.



Obr. 4-22: Schematicky znázorněný postup vyhodnocení vlastností a prvkového složení částic pomocí SEM

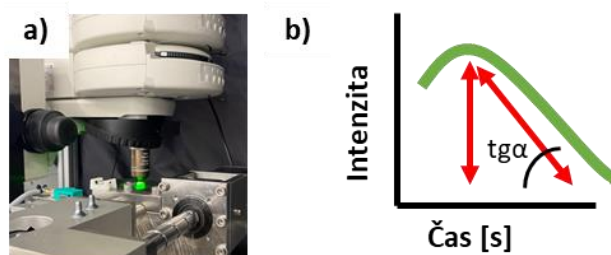
4.4.2 Analýzy účinnosti čištění zubních past

Postup analýz účinnosti čištění zubních past byl zmíněn textově v úvodním schématu metodické části (Obr.4-1) a nyní bude popsán detailně. V prvním kroku byl vzorek zubní výplně již s naneseným umělým zubním plakem focen před experimenty optickým i fluorescenčním mikroskopem, dále probíhaly simulace na tribometru a po každém simulovaném čištění byl vzorek znovu focen na optickém i fluorescenčním mikroskopu až do úplného opotřebení plaku.

Fluorescenční analýza pro vyhodnocení účinnosti čištění zubních past

Hodnoty emisní intenzity světla obarveného plaku na povrchu vzorků byly zaznamenávány před experimentem a po každém intervalu čištění pro každý vzorek na fluorescenčním mikroskopu až do úplného opotřebení (Obr. 2-23 a)). Výsledná křivka byla získána z průměrných hodnot tří časových záznamů intenzit pro každou zubní pastu (4.3.3).

Data byla následně proložena polynomem pro přehledné grafické zobrazení výsledků (Obr. 2-23 b)). Ze všech získaných křivek byly v dalším kroku vypočítány směrnice klesající části grafu, které reprezentují rychlost úbytku zubního plaku, tedy účinnost čištění. Směrnice byla získána jako tangenta trojúhelníku a její výpočet bude více přiblížen v kapitole výsledků (Obr. 2-23 b)).



Obr. 4-23: Získání hodnot intenzit světla na fluorescenčním mikroskopu (a), účinnost čištění vyhodnocena jako směrnice úbytku (tangenta) hodnot intenzity v čase z lineárně klesající části grafu (b)

Analýza obrazu pro vyhodnocení účinnosti zubních past

Data získaná z optického mikroskopu byla využita pro analýzu obrazu, která umožnila vyhodnotit procentuální úbytek zubního plaku v čase pro každou testovanou pastu. Hodnoty jednotlivých křivek v čase ve výsledcích opět představují průměrné hodnoty získané ze tří vzorků zubních výplní měřených pro každou pastu, analogicky jako u hodnocení pomocí fluorescenční mikroskopie.

Zpracování snímků z optického mikroskopu (Obr. 2-24 a)) bylo provedeno v programu MATLAB a bylo založeno na softwarovém návrhu využívajícím princip segmentace obrazu [55]. Tento software zvýraznil z každého snímku obarvený umělý plak a vyhodnotil jeho procentuální zastoupení v obrazu (Obr. 2-24 b)). Každý obrázek byl při analýze převeden do barevného prostoru HSV (hue, saturation, value), kde byly vytvořeny masky na základě definovaných rozsahů barev odpovídajících zvolenému barvivu. Tyto masky byly spojeny do jedné plochy, která reprezentuje oblast pokrytou plakem. V posledním kroku bylo určeno procentuální zastoupení plaku na povrchu zubní výplně po daném intervalu čištění. Procentuální hodnoty byly získány jako poměr počtu pixelů plaku k celkovému počtu pixelů v obrazu.

Data byla následně proložena přímkou (Obr. 2-24 c)) pro usnadnění grafického znázornění výsledků a ze všech klesajících přímek byly vyhodnoceny směrnice poklesu v programu Excel, reprezentující rychlost úbytku zubního plaku na povrchu zubních výplní v čase, tedy opět účinnost čištění.



Obr. 4-24: Focení vzorku optickým mikroskopem (a), snímky po obrazové analýze v MATLABu (b), určení účinnosti čištění jako směrnice procentuálního úbytku plaku v čase (c)

4.5 Testované predikce

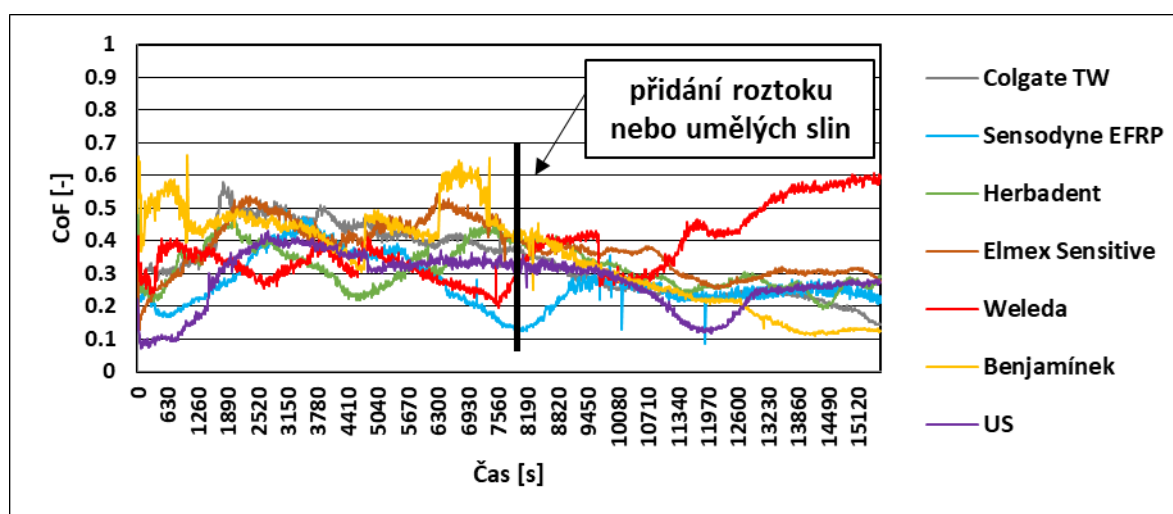
Pro ověření **H1** a **H3** (3.3) byly provedeny tribologické experimenty s vybranými zubními pastami, pro něž byl měřen časový průběh CoF a objemový úbytek materiálu zubních výplní pomocí optického profilometru Contour CT-X Bruker po simulovaném čištění na tribometru Bruker UMT TriboLab. Pro detailní výzkum vlastností abrazivních částic na tření a opotřebení zubních výplní byly částice analyzovány pomocí SEM. Ze snímků byla analyzována morfologie částic jednotlivých past (tvar, rozložení, koncentrace), kvantifikována velikost částic pomocí bodových analýz a v poslední řadě bylo vyhodnoceno hmotnostní složení prvků bodovou spektrální analýzou s využitím detektoru pro energeticko-disperzní rentgenovou spektroskopii (EDS). Díky zmíněným experimentům a analýzám bude možné odhalit vliv vlastností abrazivních částic klasických i dětských zubních past na tření, opotřebení a účinnost čištění zubních výplní.

Pro testování **H2** (3.3) byl vytvořen umělý zubní plak výzkumnou skupinou Pokročilých biomateriálů, CEITEC VUT. Následně byly provedeny tribologické experimenty s vybranými zubními pastami na tribometru Bruker UMT TriboLab, pro které proběhlo měření účinnosti čištění pomocí fluorescenční analýzy jako vyhodnocení úbytku intenzity plaku v čase a pomocí analýzy obrazu z optických snímků programem MATLAB jako procentuální úbytek obarveného plaku v čase. Dohromady s výsledky vlastností a prvkového složení abrazivních částic spolu s výsledky z opotřebení bude možné provést komplexní vyhodnocení vztahu mezi účinností čištění zubních past a opotřebením abrazivními částicemi.

5 VÝSLEDKY

5.1 Součinitele tření (CoF)

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole (4.4.1), po filtraci a zprůměrování všech měření bylo získáno celkem sedm časových průběhů CoF, vyhodnocených pro šest zubních past a pro US. Roztoky umělých slin se zubní pastou či pouze US v případě referenčního měření, byly do vany se vzorkem přidávány vždy na počátku a uprostřed měření bez zastavení experimentu. Výsledky časových průběhů CoF zobrazuje Obr. 5-1.

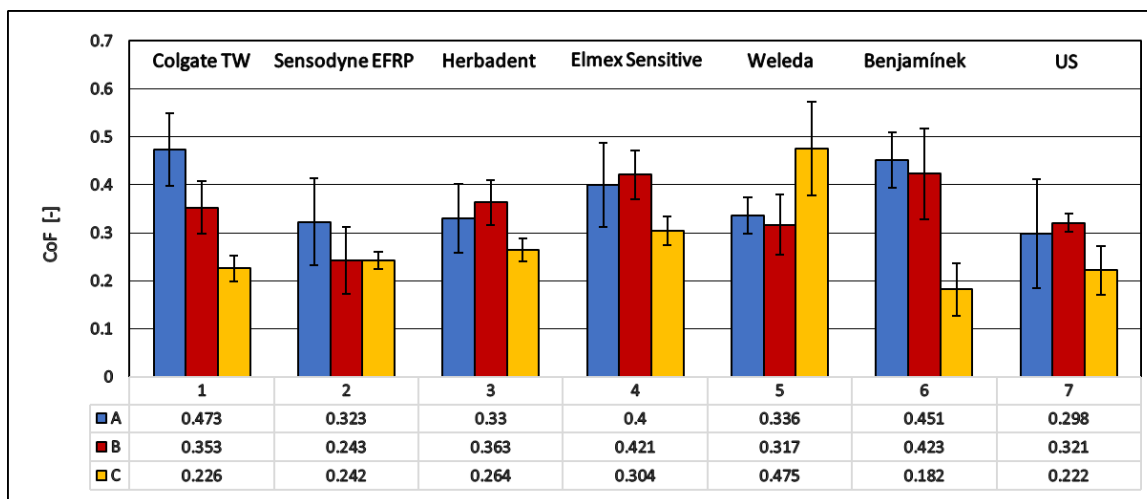


Obr. 5-1: Grafické zobrazení průměrných časových průběhů CoF se znázorněním přidání roztoku US se zubní pastou či pouze US (data byla získána jako průměrný časový průběh CoF ze tří měření pro každou pastu a pro US)

Větší výkyvy průběhů součinitele tření (CoF) byly pozorovány v první polovině experimentů. Po přidání roztoku v polovině experimentu hodnoty součinitele po určité době konvergovaly k ustálenému stavu, avšak stále bylo pozorováno jejich kolísání. Tyto výkyvy by mohly souviset s částicemi v přímém kontaktu mezi vzorkem výplně a zubním kartáčkem během simulovaného čištění. Nejhladšího časového průběhu bylo dosaženo v případě US, což lze přičíst nepřítomnosti abrazivních částic.

Při dodávání roztoku do vany se vzorkem během experimentu nedošlo k zastavení měření a roztok byl aplikován z boku vany. Mohlo tak dojít k tomu, že se do přímého kontaktu nedostalo stejné množství částic jako na počátku měření. To by vysvětlovalo i menší kolísání v druhé půlce experimentu. Současně by menší rozptyl hodnot mohl souviset také s opotřebením abrazivních částic nebo deformací zubního kartáčku po 260 minutách čištění.

Dalšími výsledky jsou průměrné hodnoty CoF získané z předchozích časových průběhů v počáteční (A), střední (B) a konečné (C) fázi experimentu. Tento typ vyhodnocení byl volen především z důvodů grafického zobrazení variabilního chování CoF v podobě směrodatných odchylek (SD). Výsledné hodnoty pro každý průběh CoF byly získány průměrováním hodnot tří měření pro 3x 86,7 minut a jsou zobrazeny jako průměr ± SD (Obr. 5-2).



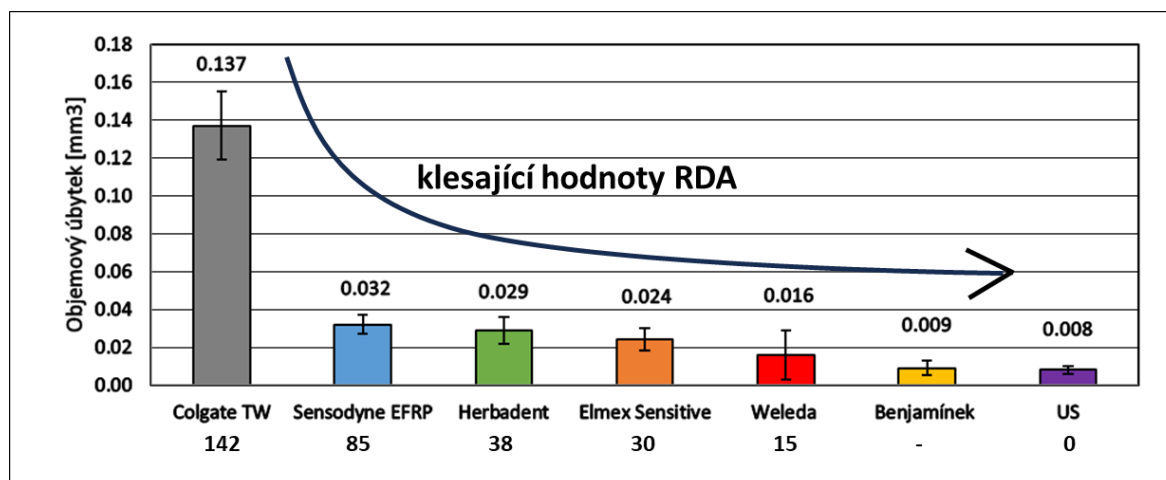
Obr. 5-2: Průměrné hodnoty CoF v počáteční (A), střední (B) a konečné (C) fázi pro měření se všemi pastami a US (výsledky časových průběhů CoF (Obr. 5-1) byly průměrovány ze tří měření do uvedených fází a zobrazeny jako průměr ± SD)

U většiny zubních past byly hodnoty CoF vyšší ve fázi A než ve fázi C. Výjimkou je dětský zubní gel Weleda, jehož hodnoty ve fázi C jsou vyšší. Jednotlivé časové průběhy před jejich zprůměrováním se v případě gelu Weleda značně lišily pro každý experiment. Zároveň je možné pozorovat, že hodnoty SD jsou poměrně vysoké, avšak u většiny past napříč fázemi postupně klesají, což by mohlo souviset s výše popsanou deformací kartáčku, obroušením částic nebo s tím, že se částice kvůli boční aplikaci nedostávaly průběžně do kontaktu. Ve střední části (B) experimentu byl roztok přidán podruhé. Tím, že nebyl 100 % zajištěn přímý kontakt částic s povrchy se však hodnoty CoF ve fázi B staly značně proměnlivými.

5.2 Objemový úbytek vzorků zubních výplní

Před a po simulaci čištění byla vždy provedena analýza topografie povrchu na profilometru, díky níž bylo možné vyhodnotit objemový úbytek zubních výplní (4.4.1). Vyhodnocené výsledky (Obr. 5-3) představují celkem sedm hodnot, z nichž každá je průměrem tří experimentů ± SD. Výsledky jsou seřazeny podle klesajících hodnot RDA, které jsou číselně zobrazeny pod názvy jednotlivých past.

Vyhodnocení objemového úbytku je do jisté míry ovlivněno lidskou chybou, protože hodnocené parametry jsou velmi malé. Nicméně jak v případě tření, tak v případě opotřebení jsou hlavními ovlivňujícími faktory to, zda částice přicházejí do přímého kontaktu. Tyto procesy jsou během měření neovlivnitelné a vysvětlovaly by hodnoty SD.

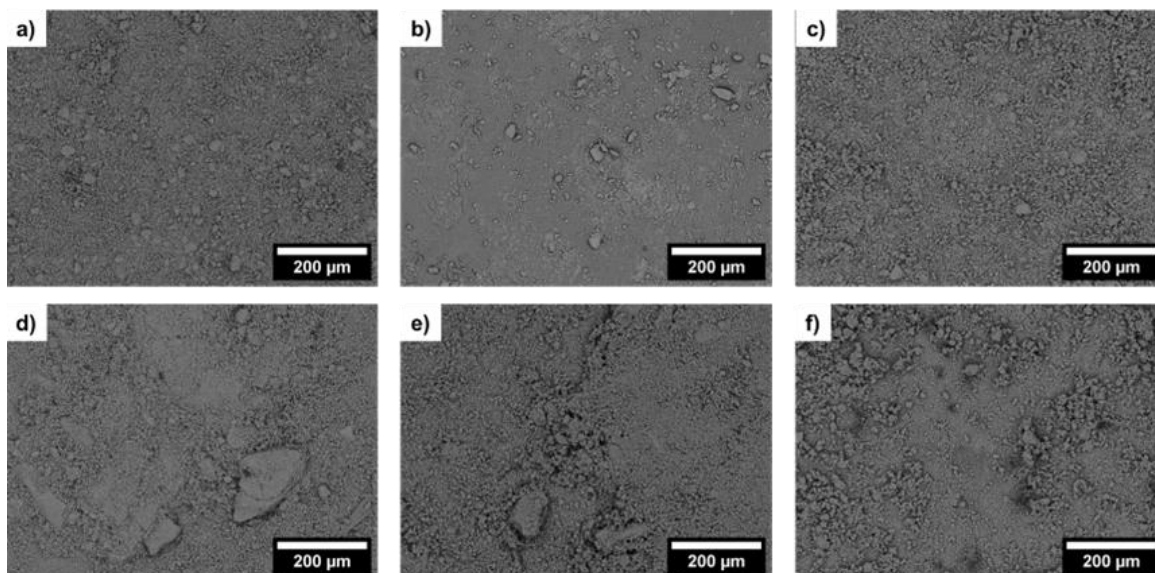


Obr. 5-3: Průměrné objemové úbytky zubních past a US seřazené s klesajícími RDA (výsledky měřeny ve třech opakováních pro každou zubní pastu a US a uvedeny jako průměr ± SD)

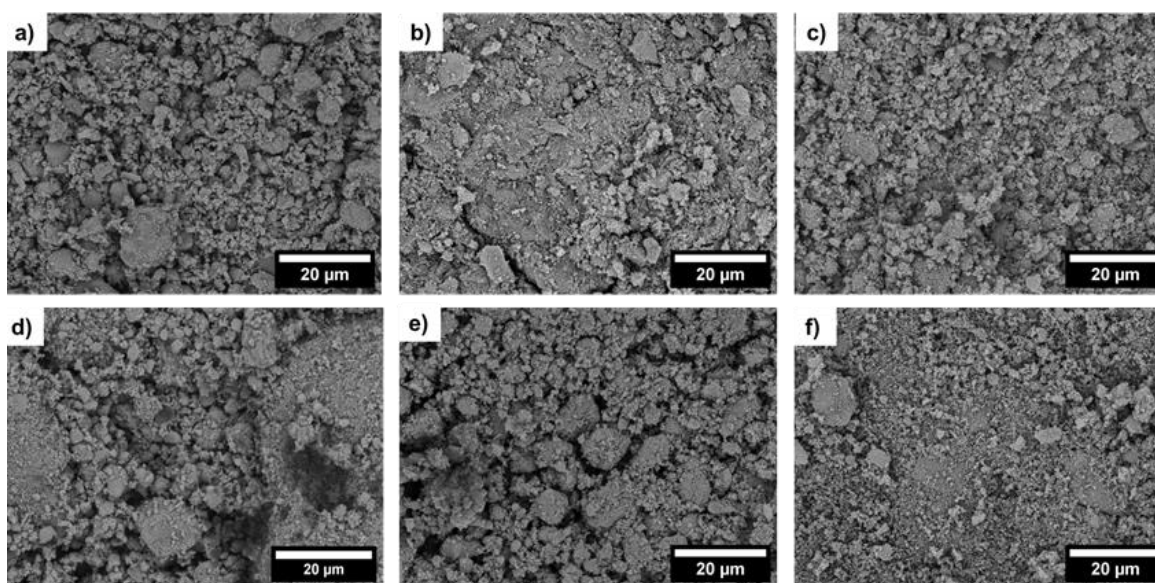
Nejvyšší hodnoty objemových úbytků dosáhla zubní pasta Colgate TW. Tato pasta měla také nejvyšší hodnotu RDA (142), což by odpovídalo maximálnímu opotřebení. Druhé nejvyšší hodnoty objemového úbytku dosáhla pasta Sensodyne EFRP, dále Elmex Sensitive, poté Herbadent, zubní gel Weleda, Benjamínek a US. Tyto hodnoty přibližně korespondují s hodnotami RDA s výjimkou pasty Sensodyne EFRP, která s poměrně vysokou hodnotou RDA vykazovala nízké hodnoty opotřebení. Ve výsledcích na Obr. 5-2 vyšly pro tuto pastu také nízké hodnoty CoF v porovnání s ostatními pastami, a to by mohlo přispívat k závěru, že se jedná o poměrně šetrnou zubní pastu z hlediska tření a opotřebení povrchů zubních výplní.

5.3 Morfologie a prvkové složení abrazivních částic

Další sadou výsledků, které odhalily morfologii, byly snímky z SEM mikroskopů (Obr. 5-4 a 5-5), které byly vyhodnoceny BSE detektorem. Snímky byly pořizovány pro 6 rozdílných zvětšení (500x, 2kx, 10kx, 50kx, 100kx, 200kx). Pro detailní vyhodnocení morfologie i prvkového složení abrazivních částic byly využity maximálně detailní snímky, tedy zvětšení 200kx. Pro zobrazení morfologie částic do výsledků však bylo zvoleno zvětšení 500x a 5kx (Obr. 5-4 a 5-5), jelikož snímky při zvětšení 200kx již nebylo možné tak přesně doostřit. Informace ohledně morfologie společně s výsledky velikostí a prvkové analýzy budou detailněji popsány na konci této kapitoly (Tabulka 5-1).

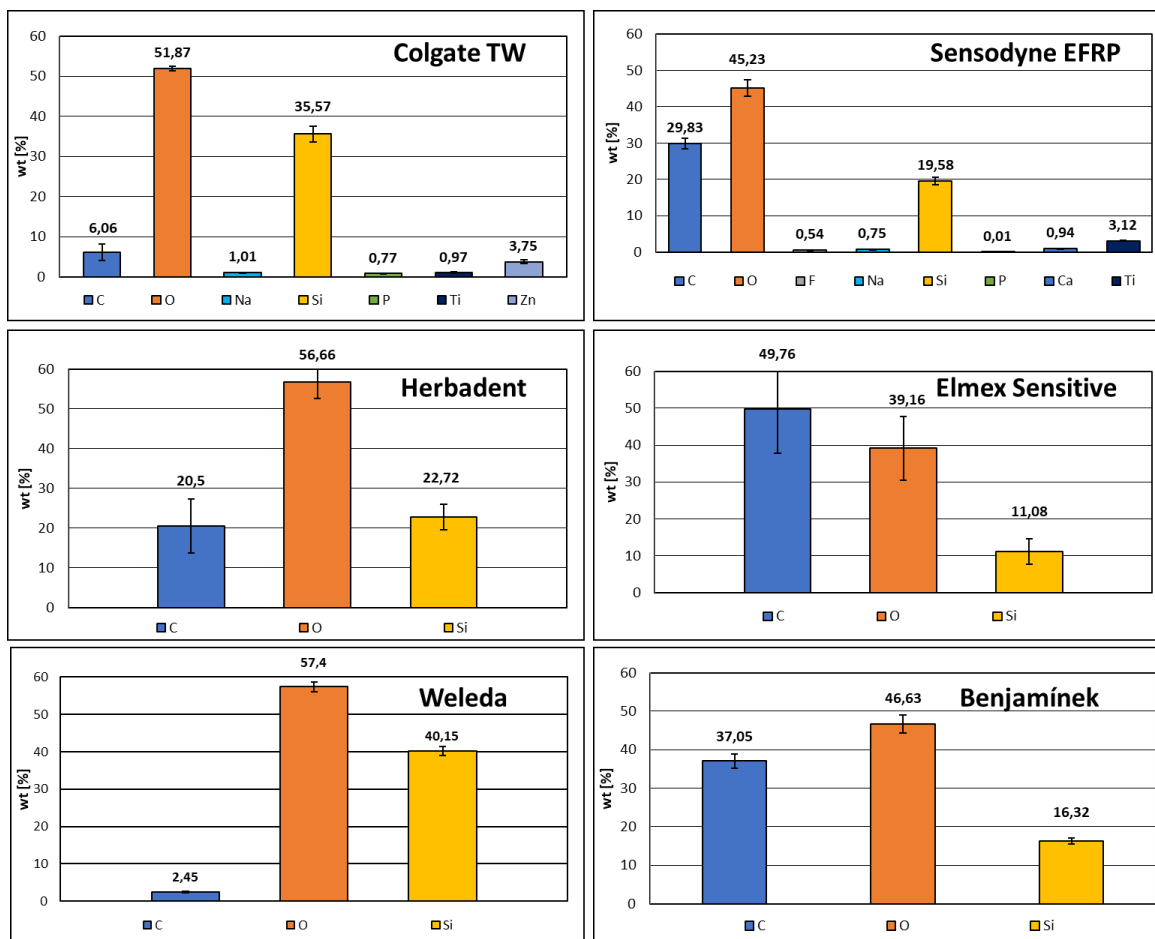


Obr. 5-4: Morfologie částic zobrazená pomocí SEM (Tescan MIRA3, Česká republika, zvětšení 500x: a) Colgate TW, b) Sensodyne EFRP, c) Herbadent, d) Elmex Sensitive, e) Weleda, f) Benjamínek)



Obr. 5-5: Morfologie částic zobrazená pomocí SEM (Tescan MIRA3, Česká republika, zvětšení 5kx: a) Colgate TW, b) Sensodyne EFRP, c) Herbadent, d) Elmex Sensitive, e) Weleda, f) Benjamínek)

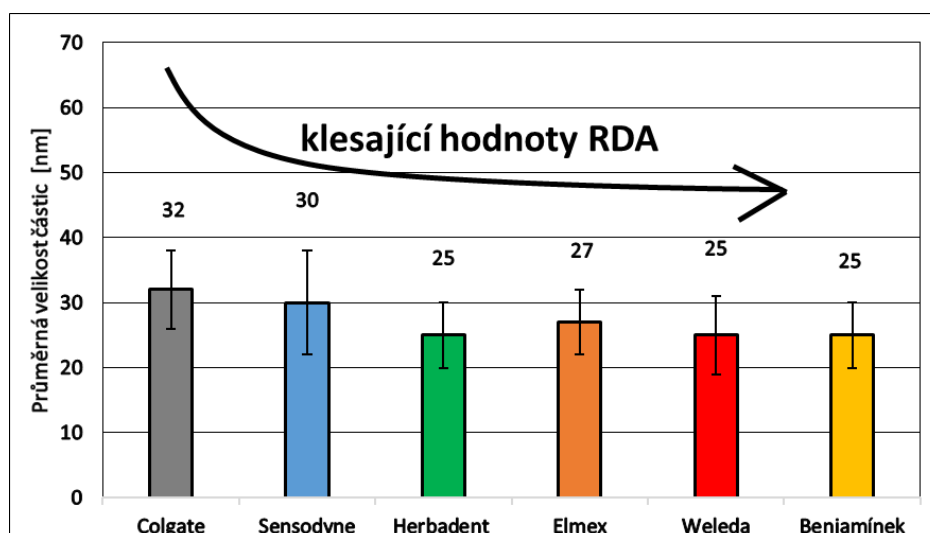
Kromě zkoumání morfologie částic byla provedena také prvková analýza pomocí EDS detektoru. Energetická spektra byla vyhodnocována při zvětšení 200kx, stejně jako velikost částic, a to pomocí spektrální bodové analýzy. Pro každou pastu byly určeny 3 až 4 náhodné body, ze kterých byla podle spekter obdržena hmotnostní procenta daných prvků. Výsledky hmotnostních procent pro všechny vybrané zubní pasty jsou zobrazeny jako průměr hodnot z vybraných bodů \pm SD (Obr. 5-6).



Obr. 5-6: Vyhodnocení hmotnostního složení prvků z bodových EDS analýz všech past (výsledky jsou zobrazeny jako průměr ze 3-4 hodnot \pm SD))

Je zřejmé, že v zubních pastách Colgate TW a Sensodyne EFRP se nachází daleko více prvků než v ostatních pastách. V případě ostatních past jsou hlavními složkami uhlík, kyslík a křemík. Přítomnost uhlíku a částečně i kyslíku může být způsobena neúplným odstraněním organické (vodnaté) části pasty, či lehké kontaminace vzorku. Zbylý křemík s kyslíkem je pak přítomný především z důvodů, že se váže do abrazivní sloučeniny oxidu křemičitého.

Dalším krokem bylo vyhodnocení průměrné velikosti částic pomocí softwaru ImageJ (4.4.1). Velikost částic byla opět vyhodnocena bodovou analýzou při zvětšení 200kx, přičemž výsledná hodnota je zobrazena jako průměr ze 100 hodnot \pm SD (Obr. 5-7).



Obr. 5-7: Průměrné hodnoty velikostí abrazivních částic pro všechny zubní pasty (výsledky jsou zobrazeny jako průměr ze 100 hodnot \pm SD)

Tabulka 5-1 shrnuje informace o typech abrazivních částic v zubních pastách vyhodnocených pomocí EDS analýz, dále obsahuje průměrné velikosti částic pro každou pastu, popis tvarů částic a jejich shluků a podrobnosti o seskupení částic.

Tabulka 5-1: Shrnující tabulka abrazivních částic a jejich vlastností

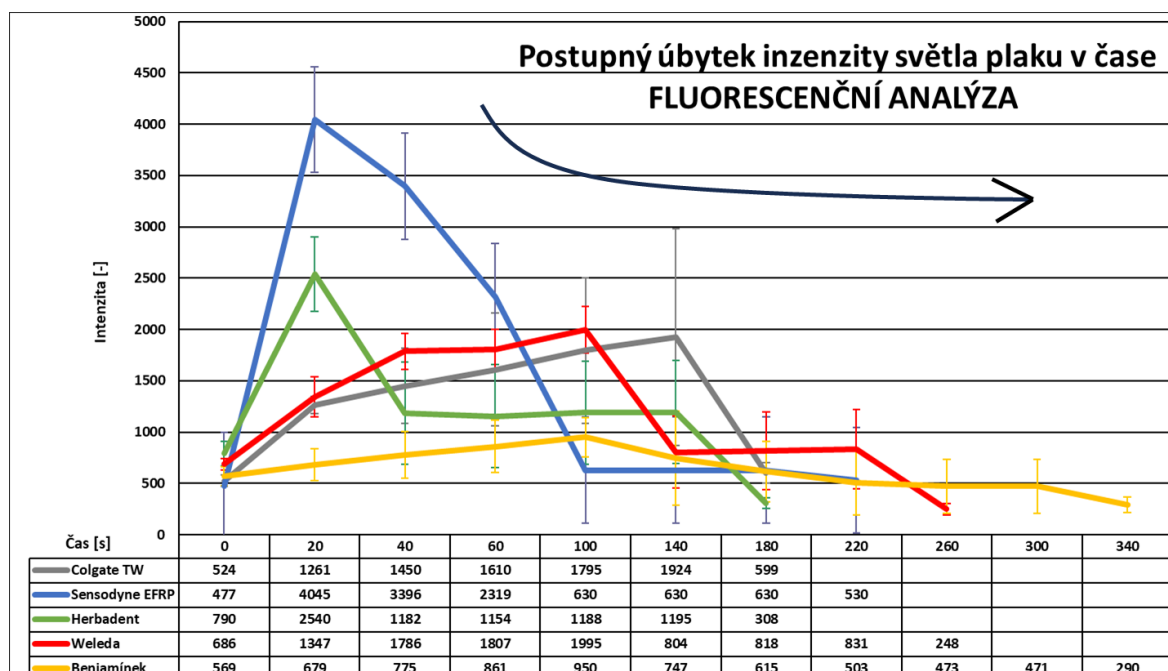
	Abrazivní částice	Průměrná velikost částic [nm]	Tvar částic	Seskupení částic
Colgate TW	oxid křemičitý, pyrofosfát vápenatý, uhelný prášek	32 \pm 6	kulaté, shluky spíše kulaté hrany	malé a střední shluky, rovnoměrně, vyšší koncentrace velkých shluků
Sensodyne EFRP	oxid křemičitý, oxid titaničitý	30 \pm 8	podlouhlé, kulaté, shluky ostrého tvaru (nejvíce)	malé a střední shluky, nerovnoměrně, nejnižší koncentrace
Herbadent	oxid křemičitý	25 \pm 5	kulaté, shluky ostřejší	malé a střední shluky, rovnoměrně, vyšší koncentrace
Elmex Sensitive	oxid křemičitý	27 \pm 5	kulaté, shluky spíše kulaté hrany	malé, střední i velké shluky, rovnoměrně, vyšší koncentrace
Weleda	oxid křemičitý	25 \pm 6	kulaté, shluky spíše kulaté hrany	malé a střední shluky, rovnoměrně, vyšší koncentrace
Benjamínek	oxid křemičitý	25 \pm 5	kulaté, shluky ostřejší	malé a střední shluky, nerovnoměrně, nižší koncentrace

Jak je uvedeno v Tabulce 5-1, všechny zubní pasty obsahují oxid křemičitý jako hlavní abrazivní složku. Zubní pasta Colgate TW měla největší velikost částic, zatímco dětské zubní gely a zubní pasta Herbadent měly částice nejmenší. Vzhledem k tomu, že všechny pasty obsahovaly stejné dominantní abrazivum, byl tvar částic především sférický. Seskupené celky měly relativně náhodný tvar a dosahovaly velikosti až 20 μm . Poměrně dost shluků obsahovala zubní pasta Colgate TW, což by v kombinaci s největší velikostí částic odpovídalo i maximálním hodnotám opotřebení. Naopak zubní pasta Sensodyne EFRP obsahovala relativně nízkou koncentraci seskupení. I přesto, že byly částice ostrých tvarů, nedokázaly držet větší celky, což vysvětluje nižší hodnoty opotřebení i přes poměrně vysokou hodnotu RDA.

5.4 Účinnost čištění zubních past

5.4.1 Fluorescenční analýza

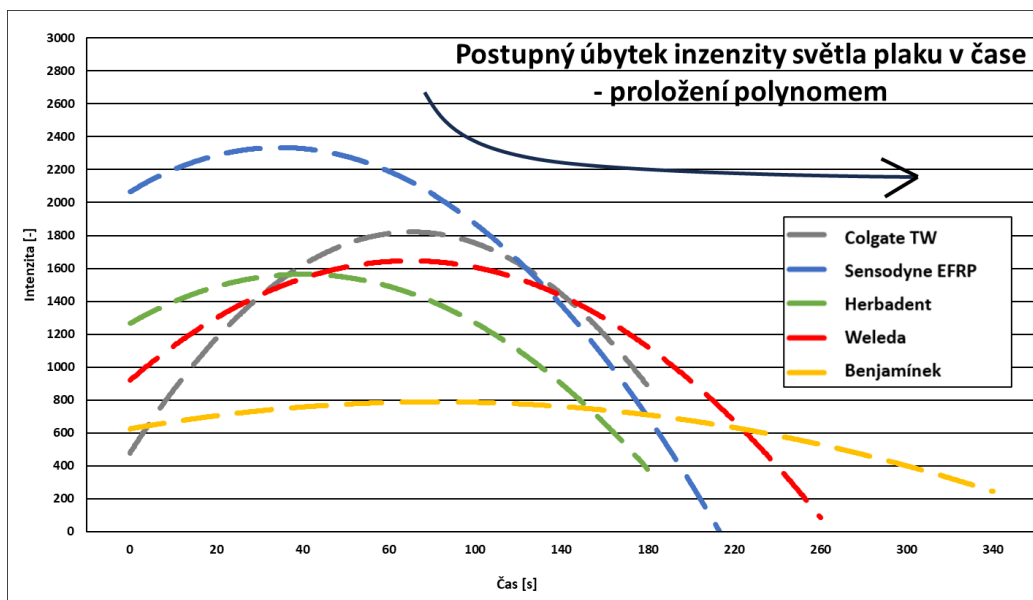
Při analýze úbytku plaku pomocí fluorescence byla měřena intenzita světla emitovaného povrchem vzorku v čase. Jak bylo uvedeno výše (4.4.2), každá křivka představuje průměrné hodnoty ze tří měření \pm SD (Obr. 5-8). Současně jsou pro všechny pasty vždy vypsaná průměrná data v konkrétním čase. Pokud je hodnota v daném čase prázdná, finální intenzita vzorku bez plaku byla již naměřena a dále neklesala.



Obr. 5-8: Fluorescenční analýza – úbytek intenzity světla v čase (výsledné křivky jsou zobrazeny jako průměr ze tří měření \pm SD)

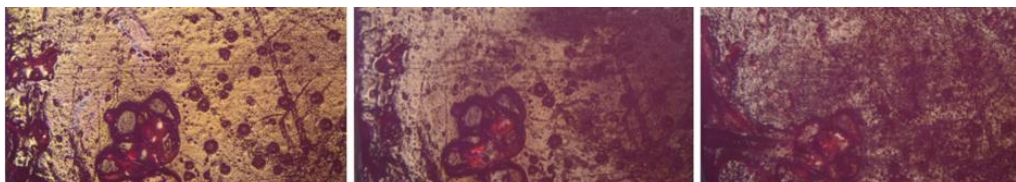
Z výsledků je patrné, že SD vyhodnocených výsledků jsou poměrně vysoké. V průběhu měření docházelo k opětovnému přichytávání plaku s barvivem na povrch plaku. Tím došlo k ovlivnění výsledné hodnoty intenzity. Současně by bylo vhodné zajistit pro snížení odchylek vyšší opakovatelnost měření.

Pro finální vyhodnocení účinnosti čištění byly spočteny směrnice úbytku intenzity světla v čase, které byly určeny z polynomického proložení dat (Obr. 5-9).



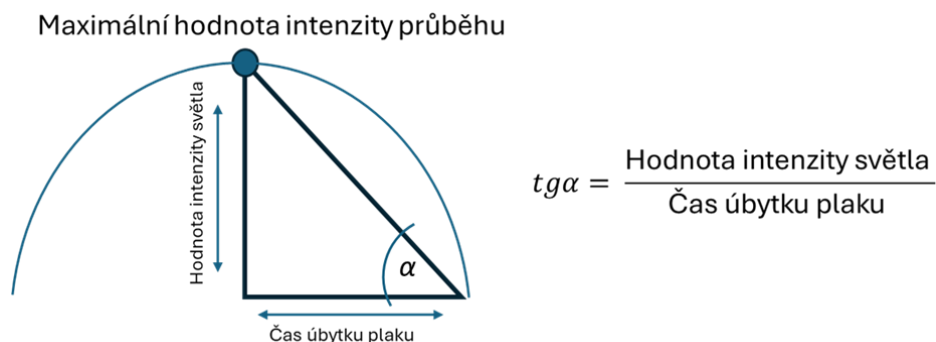
Obr. 5-9: Fluorescenční analýza: proložení polynomem pro vyhodnocení směrnice úbytku intenzit světla v čase

Z výsledků je zřejmé, že průběhy nejsou pouze klesající, ale stoupají do maxima a poté nastane pokles. Experimentálně bylo zjištěno, že barvivo použité k obarvení umělého zubního plaku, aplikované v závěrečné fázi na plak, vykazuje na počátku nižší intenzitu emitovaného světla než samotný plak. V rostoucí části grafu tedy dochází k jeho odbarvování. Teprve když hodnoty intenzit dosáhnou maxima (= hodnoty intenzit plaku a barviva jsou totožné), začne úbytek samotného plaku s méně sytým barvivem. Tento jev je zřetelný u obrazových snímků na Obr. 5-10, kde je znázorněn průběh experimentu s pastou Benjamínek, při němž se plak začal odlupovat až po 140 s. Z obrázků je zřetelné, že před experimentem je povrch vzorku sytější než po zahájení experimentu (Obr. 5-10).



Obr. 5-10: Optické snímky povrchu vzorku s naneseným obarveným plakem: Před začátkem experimentu (vlevo), po 20 s měření (uprostřed), po 100 s měření (vpravo)

Směrnice úbytku plaku neboli pokles intenzity světla v čase, byla získána jako tangenta trojúhelníku pouze z klesající části grafu, aby bylo uvažováno pouze odstraňování plaku, nikoliv vybarvování barviva (Obr. 5-11). Protilehlá strana byla hodnota intenzity světla v maximu a přilehlá strana čas od maximální hodnoty až do úplného opotřebení plaku z povrchu zubní výplně.



Obr. 5-11: Postup výpočtu směrnic pro úbytky intenzit světla v čase

Ze získaných směrnic byla vytvořena tabulka s dosaženými výsledky (Tabulka 5-2). Jak můžeme vidět, zubní pasty pro dospělé vykazovaly vyšší účinnost čištění z hlediska odstranění plaku než dětské zubní gely.

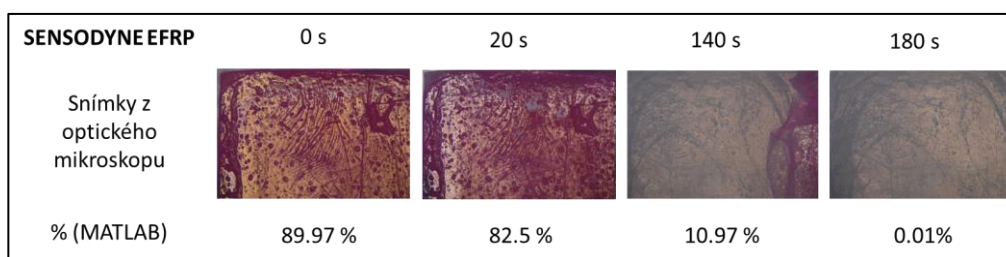
Tabulka 5-2: Hodnoty směrnic úbytků intenzit světla v čase vyhodnocených fluorescenční analýzou

Zubní pasta	Abrazivum	Velikost částic [nm]	Získaná směrnice v absolutní hodnotě
Colgate TW	oxid křemičitý, pyrofosfát vápenatý, uhelný prášek	32 ± 6	16,36
Sensodyne EFRP	oxid křemičitý, oxid titaničitý	30 ± 8	12,97
Herbadent	oxid křemičitý	25 ± 5	12,43
Weleda	oxid křemičitý	25 ± 6	8
Benjamínek	oxid křemičitý	25 ± 5	3,07

Je patrné, že zubní pasta Colgate TW vykázala maximální účinnost čištění, následovaná pastou Sensodyne EFRP a Herbadent. Dětské zubní gely Weleda a Benjamínek mají nižší účinnost čištění v porovnání se zubními pastami pro dospělé. Z hodnot velikostí a přítomnosti abrazivních složek je zřejmé, že větší velikost částic se pojila s vyšším opotřebením a počtem abrazivních složek.

5.4.2 Obrazová analýza

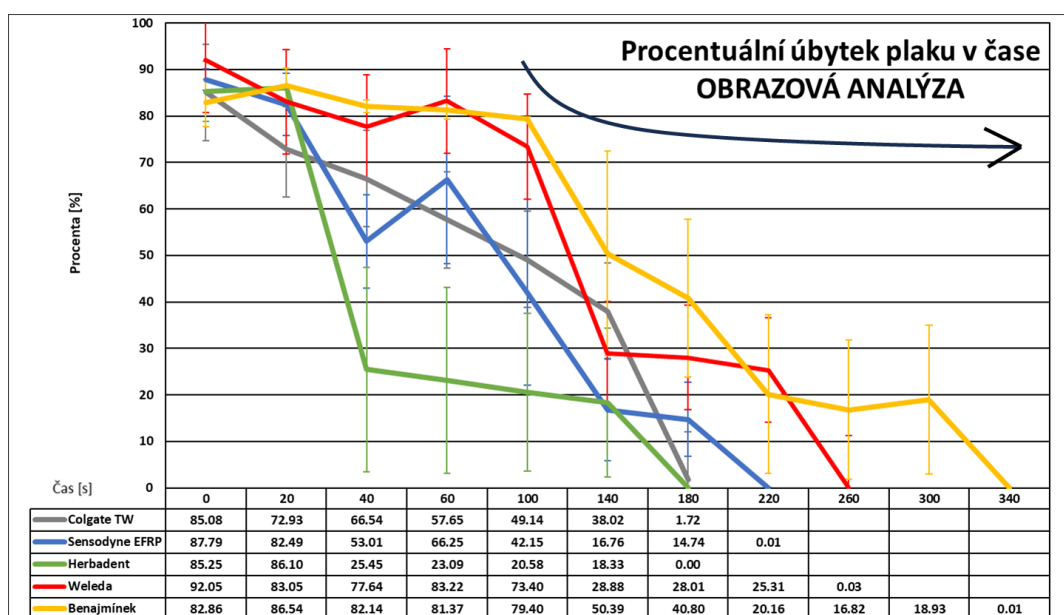
Pomocí obrazové analýzy byl vyhodnocen procentuální úbytek umělého zubního plaku v čase. Jak bylo uvedeno, pro každou pastu byly čištěny 3 vzorky zubní výplně s naneseným obarveným plakem (4.3.3), které tvoří na Obr. 5-13 jednu křivku procentuálního úbytku. Na Obr. 5-12 je znázorněn postupný úbytek zubního pro pastu Sensodyne EFRP. Jsou vybrané určité časové intervaly, při kterých docházelo k výrazným změnám, současně je opět vidět zmíněné vymývání barviva z plaku (0 → 20 → 140).



Obr. 5-12: Analýza obrazu zubní pasty Sensodyne EFRP s vybranými procentuálními úbytky plaku obrazovou analýzou v MATLABu

Můžeme vidět, že ne vždy před experimentem plak pokrýval celou plochu vzorku (pro 0 s–89.97 %), výsledky tedy nezačínají vždy ze 100 %. V průběhu přípravy záleží na rovnosti vzorku, jeho ustavení a taktéž na přesnosti nanesení plaku a barviva na povrch vzorku.

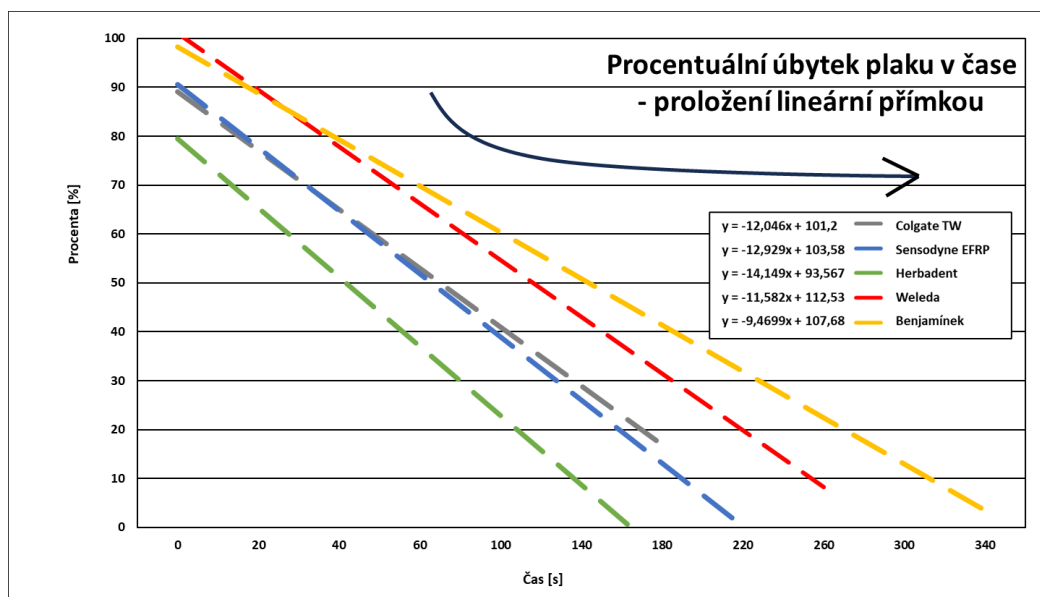
Obr. 5-13 zobrazuje získané křivky měření pro všechny pasty. Výsledky jsou zobrazeny jako pokles procent v čase, přičemž v každém okamžiku hodnota představuje průměr ze tří měření \pm SD. Pod grafem jsou pak opět vypsány průměrné hodnoty v daných časech pro každou zubní pastu. Pokud jsou hodnoty prázdné, byl plak opotřeben v předchozím intervalu a procenta dále neklesala.



Obr. 5-13: Obrazová analýza: procentuální úbytek plaku v čase (výsledky jsou zobrazeny jako průměr ze tří měření \pm SD)

Jak můžeme vidět, SD výsledků jsou velmi vysoké. Roli jistě hraje zmíněná nehomogenita, jelikož každý průběh úbytku plaku v čase se z důvodů možných nerovností povrchu či naneseného plaku choval velmi specificky. Pro snížení odchylek by bylo vhodné opět zajistit vyšší opakovatelnost.

Odhalení účinnosti zubních past bylo provedeno pomocí směrnic úbytku procent v čase. Každá zobrazená křivka na Obr. 5-13 byla proložena přímkou, z níž byly vygenerovány rovnice se směrnicí (Obr. 5-14), reprezentující sklon přímky, tedy rychlost opotřebení plaku z povrchu zubní výplně.



Obr. 5-14: Obrazová analýza – proložení křivek lineární přímkou pro získání směrnic procentuálního úbytku plaku

Absolutní hodnoty směrnic, které určují rychlost opotřebení plaku z povrchu zubní výplně zobrazuje Tabulka 5-3.

Tabulka 5-3: Hodnoty směrnic procentuálních úbytků plaku v čase vyhodnocených obrazovou analýzou

Zubní pasta	Abrázivum	Velikost částic [nm]	Získaná směrnice v absolutní hodnotě
Herbadent	oxid křemičitý	25 ± 5	14,149
Sensodyne EFRP	oxid křemičitý, oxid titaničitý	30 ± 8	12,929
Colgate TW	oxid křemičitý, pyrofosfát vápenatý, uhelný prášek	32 ± 6	12,046
Weleda	oxid křemičitý	25 ± 6	11,582
Benjamínek	oxid křemičitý	25 ± 5	9,469

Výsledky ukázaly, že dětské zubní gely byly opět šetrnější z hlediska odstranění zubního plaku. Avšak pořadí směrnic pro zubní pasty pro dospělé se liší. V případě obrazové analýzy byla z hlediska čištění nejúčinnější zubní pasta Herbadent, následovaná pastou Sensodyne EFRP a Colgate TW. Dětské zubní gely vykazaly účinnost ve stejném pořadí, a to Weleda a poté Benjamínek. V porovnání s fluorescenční analýzou v tomto případě nebyla nalezena spojitost mezi účinností a hodnotami velikostí částic nebo přítomností abrazivních složek.

5.5 Příznivost zubních past

V poslední řadě byl ze všech vyhodnocených výsledků vypočten poměr hodnoty účinnosti čištění vůči hodnotě opotřebení zubní výplně pro každou zubní pastu. Výsledkem je tzv. **hodnota příznivosti** zubní pasty. Tato hodnota je tím vyšší, čím je vyšší účinnost pasty a nižší opotřebení. Následující tabulky zobrazují výsledky příznivosti společně s jejich pořadím pro účinnosti past vyhodnocené jak fluorescenční (Tabulka 5-4), tak obrazovou analýzou (Tabulka 5-5). Zubní pasty jsou seřazeny sestupně podle hodnot RDA a výsledků opotřebení.

Tabulka 5-4: Výpočet příznivosti pasty z výsledků účinnosti fluorescenční analýzou

Zubní pasta	Výpočet (účinnost / opotřebení)	Výsledek	Pořadí
Colgate TW	$\frac{16,36}{0,137}$	119,42	5.
Sensodyne EFRP	$\frac{12,97}{0,032}$	405,31	2.
Herbadent	$\frac{11,43}{0,029}$	394,14	3.
Weleda	$\frac{8}{0,016}$	500	1.
Benjamínek	$\frac{3,07}{0,009}$	341,11	4.

Z vyhodnocených hodnot není možné určit přímou závislost s opotřebením, je však patrné, že jako nejméně příznivá pasta se jeví zubní pasta Colgate TW, která měla maximální hodnoty opotřebení. Nejlepší volbou je v tomto případě zubní gel Weleda, který měl v podílu účinnosti čištění a hodnot opotřebení nejlepší výsledek. Druhou a třetí příčku obsadily zubní pasty Sensodyne EFRP a Herbadent. Tyto pasty nevykazovaly vysokou míru opotřebení při poměrně dobré účinnosti čištění. Předposlední příčku obsadil dětský zubní gel Benjamínek, který i přes příznivé hodnoty opotřebení velmi pomalu odstraňoval zubní plak z povrchu zubní výplně.

Tabulka 5-5: Výpočet příznivosti pasty z výsledků účinnosti obrazovou analýzou

Zubní pasta	Výpočet (účinnost / opotřebení)	Výsledek	Pořadí
Colgate TW	$\frac{12,046}{0,137}$	87,93	5.
Sensodyne EFRP	$\frac{12,929}{0,032}$	404,3	4.
Herbadent	$\frac{14,149}{0,029}$	487,89	3.
Weleda	$\frac{11,582}{0,016}$	723,86	2.
Benjamínek	$\frac{9,469}{0,009}$	1052,11	1.

V případě obrazové analýzy je evidentní růst příznivosti s klesajícím opotřebením. To by v tomto případě znamenalo, že více abrazivní pasty jsou méně příznivé. Nejvíce příznivou zubní pastou se při analýze obrazu jevil dětský zubní gel Benjamínek následovaný gelem Weleda. Ze zubních past pro dospělé byla nejpříznivější zubní pasta Herbadent, poté Sensodyne EFRP a nejhorších hodnot příznivosti skrz vysoké opotřebení dosáhla zubní pasta Colgate TW. Výsledky příznivosti obou analýz se tedy stejně jako v případě výsledků účinnosti čištění neshodují a tyto nesrovnalosti budou řešeny v diskusi.

6 DISKUZE

6.1 Interpretace výsledků

6.1.1 Vliv abrazivních částic na součinitel tření (CoF)

Jak vyplývá z výsledků, nejstabilnějšího časového průběhu CoF bylo dosaženo v případě US, což je způsobeno absencí abrazivních částic. Celkově bylo zaznamenáno, že časové průběhy všech experimentů vykazovaly značnou variabilitu. Tato variabilita souvisí se skutečností, kdy nelze přesně předpovědět, kolik částic je v daném okamžiku v přímém kontaktu mezi kartáčkem a povrchem vzorku zubní výplně [56]. Výkyvy hodnot CoF byly pozorovány zejména v první polovině měření, kdy byl roztok přidán do vany se vzorkem a poté kartáček přišel do přímého kontaktu s částicemi a vzorkem zubní výplně. Bylo totiž prokázáno, že přidáním částic do přímého kontaktu je tření zvýšeno [57, 58]. V polovině experimentu byly částice aplikovány z boku vany bez přerušení experimentu, což snížilo pravděpodobnost přímého kontaktu a mohlo vést k menšímu kolísání hodnot ve druhé polovině měření (Obr. 5-1). Tomu odpovídají i postupně se snižující SD v případě vyhodnocení CoF napříč rozdělenými fázemi experimentu (Obr. 5-2). Menší rozptyl hodnot ve druhé polovině experimentu může být ale i důsledkem chování zubního kartáčku, který byl po 260 minutách čištění značně deformován. Pro maximalizaci kontaktu částic s povrchem výplně byl pro experimenty zvolen vratný pohyb a ultra jemný kartáček Curaprox 5460. Při vratném pohybu kartáčku s měkkými štětinami, které se snadno deformují, by tak měl být zachycen vyšší počet částic a jejich homogenní rozložení na koncích štětín [50, 57]. Vzhledem k času experimentu ale došlo ke zmíněné deformaci kartáčku, a to mohlo způsobit, že se štětiny na konci měření již tolik nevyvracely a mohly nabírat méně částic do kontaktu. Částice zůstávající na štětínách v neustálém kontaktu mohly být více obroušeny, zatímco nové a ostré částice se do kontaktu nedostaly. To by souviselo s nižšími hodnotami CoF na konci měření [18].

Kromě menšího rozptylu hodnot docházelo také k postupnému ustálení CoF (Obr. 5-1), s výjimkou zubního gelu Weleda. V takových případech byly vyšší hodnoty CoF ve fázi A než ve fázi C. Pokud však dojde ve fázi B k přímému kontaktu částic (při aplikaci druhé várky roztoku), projeví se to zvýšením časového průběhu součinitele podobně jako na začátku měření. V tomto okamžiku by průměrné hodnoty CoF dosáhly nejvyšších hodnot během střední fáze B (Herbadent a Elmex Sensitive).

Pro snížení odchylek a zvýšení stability experimentů při měření CoF je třeba zvážit několik faktorů. Prvním krokem by mohlo být zkrácení intervalu přidávání roztoku pro vyšší pravděpodobnost udržení konzistentní koncentrace částic v přímém kontaktu. Dalším krokem by bylo modifikovat způsob aplikace roztoku do vany se vzorkem. Řešením by mohlo být experiment přerušit, aby směs mohla být přidána přímo, nebo upravit konstrukci držáku kartáčku tak, aby umožňoval přímou aplikaci do kontaktní oblasti. Poslední optimalizací experimentů by byla výměna kartáčku v určité fázi experimentu pro zabránění případného vlivu deformace štětin kartáčku.

6.1.2 Vliv abrazivních částic na opotřebení zubních výplní

Zde výsledky prokázaly, že objemové ztráty zubních výplní se téměř ve všech případech zvyšují s hodnotou RDA [57]. Colgate TW s hodnotou RDA 142 prokázala nejvyšší míru opotřebení s hodnotou $0,137 \text{ mm}^3$ (Obr. 5-3). To by podle výsledků mohlo být přičteno nejvíce druhům abrazivních částic, maximální velikosti částic, relativně vysoké koncentraci částic a poměrně homogennímu rozložení částic.

Analýzy s výjimkou pasty Herbadent prokázaly, že s rostoucí velikostí roste i opotřebení výplní. To potvrzuje, že vyšší hodnoty RDA zubních past odpovídají i větším velikostem částic [57]. Nicméně, hodnoty nekorespondují s RDA tak, jako v případě výsledků opotřebení. Zubní pasta Herbadent (RDA 38) i přes menší velikosti částic vykázala vyšší hodnoty opotřebení ($0,029 \text{ mm}^3$) než pasta Elmex Sensitive (RDA 30; $0,024 \text{ mm}^3$). Vysvětlením by mohl být růst množství abrazivních částic s hodnotami RDA [12], přičemž větší množství by způsobilo vyšší opotřebení. Zaměření se na konkrétní vzorek pasty ovšem může vnášet určité nepřesnosti. Hodnoty velikostí částic byly průměrované ze 100 hodnot, nicméně pouze z jednoho vzorku pasty.

Jak ukazuje Obr. 5-3, hodnoty opotřebení past Herbadent a Elmex Sensitive se lišily jen nepatrně. Tyto zubní pasty měly podobné hodnoty RDA (Elmex Sensitive 30 a Herbadent 38). Sensodyne EFRP s hodnotou RDA 85 měla ve srovnání s těmito pastami poměrně nízké hodnoty opotřebení ($0,032 \text{ mm}^3$), současně vykázala také relativně nízké hodnoty CoF (Obr. 5-2). I přesto, že u pasty Sensodyne EFRP byly pozorovány částice a shluky nejostřejších tvarů, obsahovala pasta nejnižší koncentraci abraziv, které byly rozmístěny nerovnoměrně. Naproti tomu pasta Elmex Sensitive obsahovala velké shluky a částice vysoké koncentrace, které mohly díky své ostrosti zvyšovat opotřebení [18]. Zároveň jsou pro obě pasty, Herbadent i Elmex Sensitive částice rozloženy mnohem homogenněji než v případě pasty Sensodyne EFRP (Obr. 5-4, 5-5). Důležitými vlastnostmi z hlediska opotřebení zubních výplní jsou tedy rozložení částic a jejich koncentrace.

Výsledky opotřebení pro dětský zubní gel Weleda ($0,016 \text{ mm}^3$) i přes jeho homogenní rozložení částic odpovídají tomu, že shluky i částice jsou kulatých tvarů poměrně malých velikostí [18, 57]. Nejnižší hodnoty tření a opotřebení byly zjištěny u dětského zubního gelu Benjamínek ($0,009 \text{ mm}^3$), což by mohlo být důsledkem nerovnoměrného rozložení částic [10]. V případě dětských zubních gelů by výsledky opotřebení mohly souviset také s menším množstvím abraziv [29], tedy i s nižšími hodnotami RDA a nižší koncentrací částic. Oba měřené dětské zubní gely obsahují oleje, které přispívají k nižší viskozitě past, a to by mohlo vést k nižším hodnotám tření a opotřebení [10].

Jelikož hodnoty opotřebení jsou poměrně malé, tak k odchylce mohla přispívat také lidská chyba při vyhodnocování. Po některých měřeních však byla provedena měření opravná bez úspěchů snížení SD. Vliv na chybu měření má tedy primárně přítomnost částic v přímém kontaktu, která je během experimentů variabilní [56] a stálo by za zvážení její měření v průběhu experimentu.

Pomocí EDS detektoru byla provedena povrchová prvková analýza. Tato analýza poskytla jak kvalitativní, tak kvantitativní údaje o druhu a hmotnostním množství jednotlivých prvků ve struktuře [54] (Obr. 5-6). Přítomnost abraziv, jako je oxid křemičitý, pyrofosfát vápenatý nebo oxid titaničitý, byla potvrzena na základě detekce odpovídajících prvků dohromady s informacemi od výrobců. Analýza ukázala, že pouze pasty Colgate TW a Sensodyne EFRP obsahovaly prvky jiné než kyslík, křemík a uhlík. Tyto složky by mohly mít vliv z hlediska tvrdosti nebo hodnot pH povrchů na výsledky opotřebení. Díky EDS analýzám bylo možné odhalit přítomné prvky, nicméně nejsou známy informace o tvrdosti či o konkrétním chování částic při kontaktu se zubním povrchem. Na rozdíl od rentgenové fotoelektronové spektroskopie (XPS) EDS neposkytuje informace o chemických vazbách mezi prvky [59]. Touto schopností by XPS metoda mohla odhalit přesnou přítomnost abrazivních sloučenin a lépe objasnit, do jaké míry mají částice vliv. Metoda XPS je mimo jiné schopna identifikovat přítomnost kontaminantů na povrchu abrazivních částic, které by mohly ovlivnit interakce s povrchy výplňových materiálů [60]. Dalším přínosem je schopnost detekovat přítomnost povrchových vrstev nebo povlaků na částicích a poskytnout informace o chemických reakcích na povrchu zubního výplňového materiálu po aplikaci zubní pasty. Pro následující výzkum by bylo vhodné zvážit metodu XPS pro detailnější odhalení chemických vlivů.

Kromě zmíněných vlastností existují i další vlivy, které tření a opotřebení v kontaktu kartáčku, pasty a zubních povrchů ovlivňují. Jedná se o tvrdost abrazivních částic [20], typy výplňových materiálů s odlišnými vlastnostmi, chemické složení zubní pasty nebo i vlastnosti zubních kartáčků, jako je tuhost či počet a průměr štětín. Některé studie ukázaly, že tvrdší zubní kartáček zvyšuje opotřebení povrchu zubů [49, 61], zatímco jiné naznačují malou nebo žádnou souvislost s opotřebením [61, 62, 63]. Z hlediska složení zubních past mohou být přítomny oleje či rozpouštědla, jejichž vlastnosti mohou také ovlivnit tribologické výsledky [12]. V případě tvrdosti pak hraje roli, jak blízké jsou hodnoty tvrdostí abrazivních částic a čištěného povrchu [20]. Tyto faktory však nebyly předmětem diplomové práce a jako proměnná byla volena zubní pasta se zaměřením na abrazivní částice.

Všechny experimenty byly prováděny za simulovaných podmínek bez zohlednění kolísání hodnoty pH, ke kterému dochází vlivem jídla, nápojů nebo ústní hygieny. Tyto procesy mohou narušit strukturu skloviny, obnažit povrch a zvýšit riziko opotřebení [20]. Zubní pasty obsahující remineralizační látky, zejména fluorid, mohou pomoci remineralizovat povrch zubu po čištění, zvýšit hodnotu pH a tím snížit náchylnost k opotřebení [12, 29]. Hodnota pH zubních past je standardizována na 5,5, aby se zabránilo demineralizaci, protože kritické rozmezí pH pro povrch zubů je mezi 5,1 a 5,5 [25], nižší hodnoty vedou k demineralizaci struktury povrchu a tím zvyšují riziko opotřebení. Pro odhalení vlivu pH by mohly být provedeny SEM analýzy před a po simulovaném čištění z hlediska objasnění, jaké pasty mají příznivé vlivy na opotřebení a remineralizaci a jaké naopak strukturu po čištění narušují.

6.1.3 Účinnost čištění zubních past

V případě účinnosti čištění zubních past byl v rámci spolupráce výzkumnou skupinou Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT vytvořen umělý biofilm dle výše zmíněné publikace [28]. Tento biofilm byl využit pro všechny experimenty účinnosti čištění (měřené v rámci projektu CZ.01.01.01/05/23_009/0004317, aplikační partner Nobilis Tilia).

První metodou pro vyhodnocení účinnosti čištění byla fluorescenční analýza. Účinnost čištění (směrnice) byla hodnocena z polynomického proložení výsledků (Obr. 5-9) z klesající části grafu pomocí tangenty (Obr. 5-11). Nejvyšší účinnost při odstraňování plaku vykazala zubní pasta Colgate TW, následovaná pastami Sensodyne EFRP a Herbadent. Dětské zubní gely vykazaly nižší hodnoty, přičemž Benjamínek měl minimální účinnost čištění, jelikož doba odstranění plaku byla 340 s.

Tato metodika odhalila několik problémů. Je patrné, že SD měření fluorescencí byly poměrně vysoké (Obr. 5-8). Variabilita mohla být způsobena tím, že odloupené části plaku se při postupných intervalech čištění znovu přichytávaly na již nanesený obarvený plak, a to zesílilo vrstvu narůžovělého plaku na povrchu, která ovlivnila intenzitu emitovaného světla z povrchu vzorku. Z výsledků je dále patrné, že intenzita všech vzorků nejprve rostla do maximálních hodnot a až poté následoval pokles. Vysvětlením je, že intenzita světla samotného plaku byla vyšší než intenzita světla barviva. V rostoucí části grafu tedy docházelo ke snižování sytosti barviva. Po dosažení maxima představoval pokles v grafu odlupování plaku. Řešením tohoto problému by mohla být změna metodiky ve formě smíchání barviva přímo s plakem, ne jeho nanášení na povrch, což by zajistilo přímý úbytek intenzity. Zmíněné problémy přispívají k závěru, že příprava plaku vyžaduje optimalizaci.

Druhou metodou byla analýza obrazu [28]. Jak bylo zmíněno v metodice, obrazová analýza škáluje rozsah masky podle odstínu růžové. Pomocí této analýzy byl vyhodnocen procentuální úbytek obarveného plaku v čase. I zde se potvrdilo, že pasty pro dospělé byly účinnější než dětské zubní gely. Křivky úbytku plaku však ne vždy vycházely ze 100 % (Obr. 5-13, 14). To naznačuje, že plak na počátku měření nepokrýval celý povrch. Vlivem může být nedokonale rovný povrch vzorku nebo nepřesnost v nanesení plaku a barviva na povrch vzorku. Z toho důvodu by bylo vhodné analyzovat homogenitu vrstvy před experimenty například pomocí profilometru.

Pro vyhodnocení účinnosti čištění obrazovou analýzou byly křivky proloženy přímkami s rovnicemi, ze kterých byly přímo získány směrnice. Nejvyšší účinnost vykazala zubní pasta Herbadent, což potvrzuje i nejkratší průměrná doba odstranění plaku 180 s. Při testování této pasty byl u 2 ze 3 testovaných vzorků téměř odstraněn plak po době 40 s, což u žádné jiné pasty zaznamenáno nebylo. Výsledky by mohly souviset se samotným složením pasty Herbadent, která se od jiných past odlišuje bylinným složením. To může být spojeno s ovlivněním rozpustnosti zubního plaku a urychlovat tak jeho odstranění [12]. Z hlediska testování stability plaku v roztoku by bylo také vhodné zvážit testování přímo s roztokem dané pasty a slin, což by mohlo odhalit, jak moc má složení pasty vliv na rozpouštění samotného plaku. Druhou neúčinnější zubní pastou byla pasta Sensodyne EFRP a dále Colgate TW. Dětské zubní gely Weleda a Benjamínek vykazaly nižší účinnost, čímž se potvrzuje jejich šetrnější složení.

Po rešeršní části zaměřené na účinnost bylo odhaleno, že existují určitá abraziva, která zvyšují účinnost čištění při stejném nebo nižším abrazivním účinku. Jedná se o perlit (75 % SiO₂) a jedlou sodu [20, 23, 24, 25]. Přidání těchto složek by mohlo zvýšit účinnost zubních past. Bylo také prokázáno, že existuje spojitost účinnosti čištění s tvrdostí, velikostí a přítomností abrazivních částic [25]. Pokud by byly uvažovány výsledky fluorescenční analýzy, tak hodnoty účinností past klesaly s velikostí částic i s opotřebením pro všechny pasty. Současně by více účinné zubní pasty mohly souviset i s přítomností různých typů abraziv (Colgate TW a Sensodyne EFRP). V porovnání s ostatními pastami byly tyto pasty obohaceny o oxid titaničitý, pyrofosfát vápenatý a uhelný prášek. Pro potvrzení zjištěných informací je však u fluorescenční analýzy nutná úprava metodiky pro její optimalizaci a snížení odchylek měření. Obrazová analýza zmíněné závislosti nepotvrdila.

6.1.4 Příznivost zubních past

Jako shrnující výsledek pro spojení účinnosti čištění a opotřebením zubních past byl vyhodnocen jejich poměr jako hodnota příznivosti. Čím vyšší je příznivost, tím pasta účinněji čistí a méně opotřebuje povrchy zubních výplní. Výsledky příznivosti jednotlivých past odhalily rozdíly mezi metodami hodnocení. Fluorescenční analýza (Tabulka 5-4) ukázala, že nelze prokázat přímou závislost příznivosti s opotřebením. Dětský zubní gel Weleda dosáhl nejlepšího výsledku hodnot, naopak zubní pasta Colgate TW vykazovala nejnižší hodnoty příznivosti, které by mohly být spojeny s jejími vysokými hodnotami opotřebením. Po zubním gelu Weleda následovaly zubní pasty Sensodyne EFRP a Herbadent, které nevykazovaly tak vysokou míru opotřebením při poměrně dobré účinnosti čištění. Další v pořadí byl dětský zubní gel Benjamínek, který i přes příznivé hodnoty opotřebením velmi pomalu odstraňoval zubní plak z povrchu zubní výplně, což souvisí s nízkou hodnotou příznivosti.

Obrazová analýza (Tabulka 5-7) poskytla opačný trend v porovnání s opotřebením. Metodika tedy odhalila, že s rostoucím opotřebením klesá hodnota příznivosti pasty, a tedy čím je pasta abrazivnější, nemusí být pro zákazníka nutně nejlepší volbou. Nejvyšší hodnotu příznivosti dosáhl dětský zubní gel Benjamínek, následovaný gelem Weleda. Ze zubních past pro dospělé byla nejpříznivější zubní pasta Herbadent, poté Sensodyne EFRP a nejhorsích hodnot příznivosti skrz vysoké opotřebením dosáhla zubní pasta Colgate TW.

Jak bylo zmíněno, obě metody poskytují odlišné výsledky s poměrně vysokými SD. Fluorescenční analýza je ovlivněna opětovným přichytáváním plaku a vymýváním barviva. Obrazová analýza je ovlivněna nehomogenním nanesením plaku, které mohlo hrát roli i v případě analýzy fluorescenční. Pro zpřesnění fluorescenční analýzy je nutné zvážit zmiňovanou úpravu metodiky a v případě obrazové analýzy by bylo vhodné kontrolovat rovnost vzorku a homogenitu nanesené vrstvy. Pro obě metody vyhodnocení je nutné provést optimalizace a další měření pro zajištění reprodukovatelnosti.

6.2 Verifikace hypotéz

H1: Se zvyšující se velikostí abrazivních částic a ostřejšími tvary se schopnost opotřebení povrchu zubů zvyšuje. Pokud jsou částice seskupeny ve větších objemech, tvoří celkově větší velikosti a opotřebení je vyšší, jelikož se zatížení přes částice na povrch zubu přenáší více [11, 17, 28]. Zvyšujícím faktorem opotřebení zubních povrchů je také vyšší koncentrace částic a tvrdost částic [12]. Z hlediska tvrdosti bylo prokázáno, že pokud jsou abraziva tvrdostí podobné dentinu, je míra abraze nižší [20]. U všech zmíněných vlastností předpokládáme, že pro výplňové materiály budou mít vlastnosti abrazivních částic podobné účinky. V případě tření je předpoklad, že průběh součinitele tření díky komplexnímu pohybu štetin kartáčku při čištění povede k poměrně asymetrickému vývoji [22]. V detailu by se ale mělo jednat o sinusovou funkci na základě lineárně vratného pohybu kartáčku. Po přidání roztoku pasty se slinami dojde po určité době k obroušení částic a tím k poklesu a ustálení součinitele tření.

Výsledky odhalily, že s výjimkou jedné měřené zubní pasty hodnoty opotřebení rostly s velikostí částic. Homogenně rozložené částice vysoké koncentrace vedly k vyšším hodnotám tření i opotřebení. Pasty s částicemi a shluky ostrých tvarů vykazovaly hodnoty tření a opotřebení vyšších hodnot. Nicméně, přestože zubní pasta Sensodyne EFRP obsahovala nejostřejší částice, i tak pasty Elmex Sensitive a Herbadent měly vyšší hodnoty tření a opotřebení. Jako prioritní vlastnosti past se tedy jeví rozložení a koncentrace částic, jelikož obě zmíněné pasty obsahovaly vysoké koncentrace homogenně rozložených částic.

Dětské zubní gely vykazaly nejnižší míru opotřebení. V případě dětského zubního gelu Weleda by vysvětlením mohla být malá velikost částic kulatých tvarů, zubní gel Benjamínek pak obsahoval nerovnoměrně rozložené částice nízké koncentrace. Celkově měly dětské zubní gely nižší hodnoty RDA, což souvisí i s nižší koncentrací částic v zubní pastě. **První hypotéza je tedy z hlediska opotřebení potvrzena**, je ale nutné se zaměřit na důležitost jednotlivých vlastností. Tvrdost částic v práci zkoumána nebyla.

Část hypotézy týkající se tření byla potvrzena. Komplexní pohyb štětín kartáčku vede k asymetrickému vývoji CoF, který vykazuje v detailu sinusový průběh díky lineárně vratnému pohybu kartáčku. V průběhu experimentu postupně došlo k poklesu a mírnému ustálení CoF, nicméně to nemuselo přímo souviset s obroušením částic. Boční aplikace roztoku v polovině experimentu bez zastavení mohla ovlivnit množství částic v přímém kontaktu a tím snížit a mírně ustálit průběh CoF. Zároveň byl po 260 minutách experimentu kartáček značně deformován a jeho schopnost nabírání částic do kontaktu byla snížena. V kontaktu tak zůstávaly částice již obroušené a tření vykazovalo nižší hodnoty.

H2: Na základě nerozpustnosti abrazivních částic ve vodě a jejich schopnosti obrousit povrch výplňového materiálu je předpoklad, že s rostoucím opotřebením výplně poroste účinnost čištění zubních past. Tento předpoklad z části vyvrací publikace, která odhalila, že pro maximální účinnost čištění zubní pasty obohacené o perlit nevyšly maximální hodnoty opotřebením [24]. Účinnost tedy přímo nezávisí na opotřebením, ale také na volbě abrazivních částic [18]. Některé studie prokazují, že přidáním perlitu lze docílit vyšší účinnosti při stejném nebo menším abrazivním účinku [22, 23, 24]. Současně existuje kritická velikost částic, pro kterou jsou hodnoty účinnosti čištění nejvyšší [31]. Druhá hypotéza tedy předpokládá, že by mohla existovat závislost účinnosti čištění na velikosti částic a na přítomných abrazivech.

Jak bylo zmíněno v diskusi, fluorescenční analýzy účinnosti čištění prokázaly, že s rostoucí velikostí a počtem abraziv roste účinnost čištění. Nicméně, obrazová analýza druhou hypotézu vyvrací. Hodnoty odchylek měření obou analýz byly poměrně vysoké a je nutné provést další testování pro zajištění reprodukovatelnosti. Pro kompletní potvrzení či vyvrácení této hypotézy by bylo vhodné optimalizovat přípravu plaku jeho přímým smícháním s barvivem místo nanesení barviva na povrch plaku, čím se zamezí vymývání barviva a tím ovlivnění hodnot intenzit světla. Kontrola homogenního nanesení plaku s barvivem, stejně jako rovinnost povrchu vzorku, by pak mohla být provedena na optickém profilometru.

H3: Předpokladem je nižší míra opotřebením u dětských past, jelikož v rámci větší šetrnosti se přidává do past pro děti méně abrazivních částic [29]. Současně jsou do past přidávány fluoridové složky, které snižují riziko vzniku kazu a zvyšují hodnotu pH erodovaného povrchu, čímž zvyšují odolnost skloviny vůči abrazi [30]. V této práci budou měřeny pasty bez fluoridů, i tak je předpoklad, že pro dětské zubní pasty bude tření a opotřebením vykazovat nižší hodnoty z hlediska šetrnosti pro dětské chrupy.

Třetí hypotéza byla potvrzena, jelikož všechny výsledky prokázaly, že hodnoty opotřebením v případě dětských zubních gelů vykazovaly nižší hodnoty opotřebením v porovnání se zubními pastami pro dospělé.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala vlivem abrazivních částic v zubních pastách na tření, opotřebení a účinnost čištění zubních výplní. Po rešeršní části práce byla odhalena mezera v poznání, která popisuje nedostatek studií na zmíněnou problematiku. Většina prací se zabývá přímo zubními povrchy, jako je dentin či sklovina, nicméně nevytváří souhrnný přehled tribologických účinků zubních past na výplňové materiály. Tato práce vytváří komplexní metodiku pro posouzení příznivosti zubních past, spojující účinnost čištění a opotřebení. Na základě provedených měření a analýz byly vyvozeny následující závěry:

- Časové průběhy CoF vykazují asymetrický vývoj a závisí na množství abrazivních částic v přímém kontaktu zubního kartáčku a povrchu zubní výplně.
- S rostoucí velikostí, ostroty a koncentrací abrazivních částic se zvyšuje opotřebení povrchu zubní výplně.
- Homogenně rozložené částice vysoké koncentrace vedou k vyšším hodnotám tření i opotřebení a z hlediska vlivných vlastností se považují za více prioritní.
- Dětské zubní pasty vykazují nižší míru opotřebení.
- Fluorescenční analýza potvrzuje závislost účinnosti čištění na velikosti částic a spojitost s přítomnými abrazivy, obrazová analýza tuto závislost vyvrací.
- Analýza obrazu odhalila, že s rostoucím opotřebením klesají příznivosti zubních past. Hodnoty příznivosti tak potvrzují, že abrazivnější zubní pasty nejsou nutně šetrnou volbou ústní hygieny, i přes vyšší účinnost čištění.
- Fluorescenční i obrazová analýza představují potenciál pro měření účinnosti čištění zubních past, je však nutné provést optimalizace.

Pro zvýšení stability experimentů by bylo vhodné zkrátit intervaly přidávání roztoků past se slinami a upravit způsob jejich aplikace, aby se abrazivní částice v průběhu experimentů dostávaly do přímého kontaktu kartáčku a zubní výplně. Dalším krokem pro zlepšení by mohla být výměna kartáčku během experimentu z důvodů menší deformace. V případě analýzy částic pak využití rentgenové fotoelektronové spektroskopie (XPS) pro detailnější informace o chemických vazbách abrazivních částic.

Práce je velkým přínosem pro společnost i výrobce zubních past, jelikož poskytuje novou metodiku pro hodnocení vlivu abrazivních částic v zubních pastách na tření, opotřebení a účinnost čištění. Pro výrobce zubních past tato práce poskytuje nástroj pro optimalizaci složení produktů s cílem dosáhnout maximálních hodnot účinností čištění při zachování nízkých abrazivních účinků. Pro zákazníka naopak poskytuje informace důležité při výběru vhodné zubní pasty, jako například zvážení hodnoty RDA.

Diplomová práce potvrdila, že vyšší hodnota RDA je spojena s vyšším opotřebením povrchů zubních výplní, se kterou podle obrazové analýzy klesá příznivost zubní pasty. Dále je nutné věnovat pozornost chemickému složení zubní pasty, konkrétně přítomnosti abrazivních částic, rozpouštědel a hodnotě pH. Některá abraziva mohou zvýšit účinnost čištění, ale také zvyšují riziko opotřebenění výplňových materiálů. Rozpouštědla a pH pak mohou ovlivnit celkové zdraví ústní dutiny.

8 VÝSLEDKY VÝZKUMU PODLE RIV



Publikační výsledek:

Článek v impaktovaném časopise *Wear*. Nyní v oponentním řízení.

Assessment of the effect of toothpaste abrasiveness on friction and wear of dental fillings

Author: Pavla Formánková^{1*}, Veronika Pavlišnáková², Pavel Čípek¹, Petr Svoboda³, Alena Dančová⁴, Lucy Vojtová², Martin Vrbka¹

¹*Biotribology Research Group, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Czech Republic*

²*CEITEC – Central European Institute of Technology, Brno University of Technology, Purkyňova 656/123, 612 00 Brno, Czech Republic*

³*Department of Stomatology, Faculty of Medicine and St. Anne's Faculty Hospital, Masaryk University, Pekařská 664/53, 602 00 Brno, Czech Republic*

⁴*Nobilis Tilia s.r.o., Vlčí Hora 147, 407 47 Krásná Lípa, Czech Republic*

*Corresponding author, Tel.: +420 728 482 897, E-mail address: pavla.formankova@vutbr.cz

Abstract: There is a notable deficiency in detailed investigations regarding the impact of abrasive elements on the friction and wear of dental restorations. Therefore, the primary objective of this study was to analyse how abrasive particles in toothpastes affect the friction and wear of dental fillings. The coefficient of friction (CoF) was evaluated as a time course from a brushing simulation conducted on a UMT TriboLab tribometer, which measured frictional and normal forces over a duration of 260 minutes. The tribological system consisted of three components: a Curaprox Ultra Soft 5460 toothbrush, a sample of dental filling material, and a mixture of artificial saliva (AS) combined with selected toothpaste. Six different toothpastes were evaluated (four for adults and two for children), varying in relative dentin abrasivity (RDA) values. Measurements with AS served as reference data. Wear was quantified by topographical analysis using a Bruker Contour GT-X optical profilometer to assess the samples before and after brushing, followed by volume loss calculations. Particle morphology was studied using a Tescan MIRA3 microscope, and the element analysis of evaluated toothpastes was performed using energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Results indicated that friction was highly variable, influenced by the random presence of particles in contact. While wear and particle size generally increased with RDA value, this relationship was not entirely consistent. Finally, it was revealed that the aggregate size of pastes and their density also affected the friction and wear of the fillings.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LANZA, Antonio, Alessandro RUGGIERO a Ludovico SBORDONE. *Tribology and dentistry: A commentary*. B.m.: MDPI AG. březen 2019. ISSN 20754442. Dostupné z: doi:
- [2] JOHANNSEN, Gunnar, Georg TELLEFSEN, Annsofi JOHANNSEN a Anders LILJEBORG. The importance of measuring toothpaste abrasivity in both a quantitative and qualitative way. *Acta Odontologica Scandinavica*. 2013, roč. 71, č. 3–4, s. 508–517. ISSN 00016357.
- [3] JOHN, S S, D J White - J Clin DENT a UNDEFINED 2015. History of the development of abrasivity limits for dentifrices. *researchgate.net*. 2015.
- [4] MAIER, Eva, Jan RUBEN, William M. PALIN, Ewald BRONKHORST, Manuel OLMOS, Ragai Edward MATTA a Bas LOOMANS. Developing an optimised method for accurate wear testing of dental materials using the ‘Rub&Roll’ device. *Scientific Reports*. 2024, roč. 14, č. 1. ISSN 20452322.
- [5] TSUJIMOTO, Akimasa, Wayne W. BARKMEIER, Nicholas G. FISCHER, Kie NOJIRI, Yuko NAGURA, Toshiki TAKAMIZAWA, Mark A. LATA a Masashi MIAZAKI. *Wear of resin composites: Current insights into underlying mechanisms, evaluation methods and influential factors*. B.m.: Elsevier Ltd. 1. květen 2018. ISSN 22136851. Dostupné z: doi:
- [6] ZHENG, Yong, Kian BASHANDEH, Ahmad SHAKIL, Swarn JHA a Andreas A POLYCARPOU. *Review of dental tribology: Current status and challenges*. B.m.: Elsevier Ltd. březen 2022. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:
- [7] *How Long Should a Dental Filling Last?* . [vid. 20. duben 2025]. Dostupné z: <https://www.broadwayfamilydentalpc.com/blog/how-long-should-a-dental-filling-last/>
- [8] QVIST, Vibeke, Agneta POULSEN, Poul Thorpen TEGGLERS a Ivar A. MJÖR. The longevity of different restorations in primary teeth. *International Journal of Paediatric Dentistry*. 2010, roč. 20, č. 1, s. 1–7. ISSN 09607439.
- [9] DORIN RUSE, N. What_is_a_compomer. *Journal of the Canadian Dental Association*. nedatováno.
- [10] MARTÍNEZ-CRUZ, Florencio S, Manuel VITE-TORRES, Alejandra MORAN-REYES a Jorge A BRAVO-MEJÍA. Wear and friction characterisation of some restorative dental materials. *Tribology and Materials*. 2022, roč. 1, č. 1, s. 27–34. ISSN 28129717.

- [11] AMARAL, M. *Biotribology and biological behaviour of nanocrystalline diamond (NCD) coatings for medical applications*. B.m.: Elsevier Ltd. 2013. ISBN 9780857093400. Dostupné z: doi:
- [12] BAIG, Mahdiyyah. *UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON FACULTY OF ENGINEERING AND THE ENVIRONEMENT National Centre for Advanced Tribology at Southampton (nCATS) Understanding the role of tribology in maintaining oral hygiene*. 2018.
- [13] ZAMPETTI, P. a A. SCRIBANTE. Historical and bibliometric notes on the use of fluoride in caries prevention. *European Journal of Paediatric Dentistry*. 2020, roč. 21, č. 2, s. 148–152. ISSN 2035648X.
- [14] WINNIER, Jasmin, Sanjana KODICAL, Ashveeta SHETTY, Arwa SONI, Parnaja VALKE a Miloni SANGHAVI. Use of Fluoridated Toothpaste in Children – A Review. *International Journal of Current Research and Review*. 2021, roč. 13, č. 05, s. 180–185. ISSN 22312196.
- [15] SUBRAMANIAN, S, D Appukuttan - Journal OF ... a UNDEFINED 2017. The role of abrasives in dentifrices. *researchgate.net*. 2011.
- [16] SCCS (Scientific Committee on Consumer Safety), Opinion on triclosan, ADDENDUM to the SCCP Opinion on Triclosan (SCCP/1192/08). 2009.
- [17] HAMZA, Blend, Moritz TANNER, Thomas ATTIN a Florian J WEGEHAUPT. Dentin Abrasivity and Cleaning Efficacy of Novel/Alternative Toothpastes. *Oral health & preventive dentistry*. 2020, roč. 18, č. 1, s. 713–718. ISSN 1757-9996.
- [18] BAIG, M., R. COOK, J. PRATTEN a R. WOOD. The effect of shape and size distribution of abrasive particles on the volume loss of enamel using micro-abrasion. *Wear*. 2020, roč. 448–449. ISSN 00431648.
- [19] FERREIRA, Meire Coelho, Maria Letícia RAMOS-JORGE, Alberto CARLOS, Botazzo DELBEM, Ricardo DE a Sousa VIEIRA. *Effect of Toothpastes with Different Abrasives on Eroded Human Enamel: An in situ/ex vivo Study*. 2013
- [20] MYNENI, Srinivas R. Effect of baking soda in dentifrices on plaque removal. *Journal of the American Dental Association (1939)*. 2017, roč. 148, č. 11S, s. S4–S9 [vid. 9. duben 2023]. ISSN 1943-4723.
- [21] MUNTEAN, Alexandrina, Sorina SAVA, Ada Gabriela DELEAN, Ana Maria MIHAILESCU, Laura Silaghi DUMITRESCU, Marioara MOLDOVAN a Dana Gabriela FESTILA. Toothpaste composition effect on enamel chromatic and morphological characteristics: In vitro analysis. *Materials*. 2019, roč. 12, č. 16. ISSN 19961944.

- [22] BAIG, M, R B COOK, J PRATTEN a R WOOD. Evolution of wear on enamel caused by tooth brushing with abrasive toothpaste slurries. *Wear*. 2021, roč. 476. ISSN 00431648.
- [23] JOINER, A, M J PICKLES, J R MATHESON, E WEADER, L NOBLET a E HUNTINGTON. Whitening toothpastes: effects on tooth stain and enamel. *International Dental Journal*. 2002, roč. 52, č. 5 SUPPL.2, s. 424–430. ISSN 0020-6539.
- [24] PICKLES, M J, M EVANS, C J PHILPOTTS, A JOINER, R J M LYNCH, N NOEL a M LAUCELLO. In vitro efficacy of a whitening toothpaste containing calcium carbonate and perlite. *International Dental Journal*. 2005, roč. 55, č. 3 SUPPL. 1, s. 197–202. ISSN 00206539.
- [25] JOINER, Andrew. Review of the extrinsic stain removal and enamel/dentine abrasion by a calcium carbonate and perlite containing whitening toothpaste. *International dental journal*. 2006, roč. 56, č. 4, s. 175–180 [vid. 9. duben 2023]. ISSN 0020-6539.
- [26] MACPHERSON, L. M.D., K. W. STEPHEN, A. JOINER, F. SCHÄFER a E. HUNTINGTON. *Comparison of a conventional and modified tooth stain index*. B.m.: Blackwell Munksgaard. 2000. ISSN 03036979. Dostupné z: doi:
- [27] WANG, Changxiang, Robert LUCAS, Michael MILWARD a Paul R. COOPER. Particle Size Effects on Abrasion, Surface Polishing and Stain Removal Efficacy in a Tooth Model System. *Biotribology*. 2021, roč. 28 [vid. 8. duben 2023]. ISSN 23525738.
- [28] KUNZE, Jan Philipp, Klaus BOENING, Heike MEISSNER a Katarzyna KRESSE-WALCZAK. Novel Artificial Biofilm Equivalent for Denture Surfaces: A Pilot Study. *International Journal of Polymer Science*. 2022, roč. 2022. ISSN 16879430.
- [29] STOVELL, A G, B M Newton - International DENTAL ... a UNDEFINED 2013. Important considerations in the development of toothpaste formulations for children. *Wiley Online Library*. 2013, roč. 63 Suppl 2, s. 57–63.
- [30] PASSOS, V F, R B R A SOUSA, M A S DE MELO, E A B GOMES, S L SANTIAGO a J P M LIMA. In vitro effect of children's toothpaste on brushing abrasion of eroded primary enamel. *European Archives of Paediatric Dentistry*. 2021, roč. 22, č. 2, s. 157–162. ISSN 19969805.
- [31] WANG, Changxiang, Robert LUCAS, Michael MILWARD a Paul R COOPER. Particle Size Effects on Abrasion, Surface Polishing and Stain Removal Efficacy in a Tooth Model System. *Biotribology*. 2021, roč. 28. ISSN 23525738.

- [32] *UMT Tribolab I Bruker*. 2020 [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/test-and-measurement/tribometers-and-mechanical-testers/umt-tribolab.html>
- [33] *ContourX-1000 I Bruker*. [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/test-and-measurement/3d-optical-profilers/contourx-1000.html>
- [34] VRÁNA, Jakub. *Hodnocení topografie povrchu strojních součástí pomocí optického profilometru*. Brno, 2017. Rešeršně syntetická. Vysoké učení technické v Brně.
- [35] *Filtration Techniques - Surface Metrology Guide - Digital Surf*. [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-filtration-techniques.html>
- [36] GIRÃO, Ana Violeta, Gianvito CAPUTO a Marta C. FERRO. Application of Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS). *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2017, roč. 75, s. 153–168. ISSN 0166526X.
- [37] *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: <https://app.biorender.com/biorender-templates/figures/all/t-60ba4a98083f9900a9faf3d1-scanning-electron-microscopy-sem>
- [38] *Fluorescence Microscopy*. [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: <https://app.biorender.com/biorender-templates/t-5fdb7afbeb8cd00aba53e7b>
- [39] *Brightfield Microscopy*. [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: <https://app.biorender.com/biorender-templates/figures/all/t-6363ce193b6890566d6d747c-brightfield-microscopy>
- [40] *LAMPY POLYMERIZAČNÍ I DentAll.cz*. [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: <https://www.dentall.cz/kategorie/989/lampy-polymerizacni>.
- [41] *Dyract flow - kompomer, 2x1ml - JANDA - DENTAL.cz*. [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: <https://www.janda-dental.cz/dyract-flow-kompomer--2x1ml-a2/>
- [42] *Zubní pasta HERBADENT Original I NOVYSRO.CZ*. [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: <https://www.dedekkorenar.cz/zubni-pasta-herbadent-bylinna/>
- [43] *Weleda dětský zubní gel I NOTINO.cz*. [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: https://www.notino.cz/weleda/dental-care-detsky-zubni-gel/p-610178/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-pyqBhDmARIsAKd9XIO4A1xah3lJK-fVYy7OhqNR-oepj8Ur6mTw5aBXJhES3vF7ZFIOesQaAkTwEALw_wcB

- [44] *Dětský zubní gel Benjamínek I ESHOP.NOBILIS.CZ.* [vid. 23. březen 2025].
Dostupné z: https://eshop.nobilis.cz/produkt/detsky-zubni-gel-benjaminek?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-pyqBhDmARIsAKd9XIMhTKQVJO4UNFy_bC4HSULroCG7EcTg55IeWr9GVGfW50AQG-IvYf0aApjhEALw_wcB
- [45] *Elmex sensitive zubní pasta 75 ml I NAZUBY.cz.* [vid. 23. březen 2025].
Dostupné z: https://www.nazuby.cz/Elmex-Sensitive-zubni-pasta-75ml?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-pyqBhDmARIsAKd9XIObbqsm3A9v80dc7mA0ao2e1w3V5LQ428jUPUJZB5BqI5fFoELJ--0aAgB0EALw_wcB
- [46] *Sensodyne Repiar Protect zubní pasta Extra Fresh 75 ml I TOMATO.CZ.* [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: https://www.tomato.cz/sensodyne-repair-protect-zubni-pasta-extra-fresh-75ml/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-pyqBhDmARIsAKd9XIPpREaNFOvcWGQeCmv-97B1ZbBxY-9tR923XcfDhE5GANwIauC_acsaAgbpEALw_wcB
- [47] Colgate zubní pasta Total Whitening I PEMI.CZ. nedatováno [vid. 23. březen 2025].
- [48] *Zubní kartáček 5460 ULTRA SOFT I ALLEGRO.CZ .* [vid. 23. březen 2025].
Dostupné z: <https://allegro.cz/nabidka/zubni-kartacek-curaprox-5460-ultra-soft-x3-11445550702>
- [49] HAMZA, Blend, Moritz TANNER, Philipp KÖRNER, Thomas ATTIN a Florian Just WEGEHAUPT. Effect of toothbrush bristle stiffness and toothbrushing force on the abrasive dentine wear. *International Journal of Dental Hygiene*. 2021, roč. 19, č. 4, s. 355–359. ISSN 16015037.
- [50] BIZHANG, Mozhgan, Ilka SCHMIDT, Yong Hee Patricia CHUN, Wolfgang H ARNOLD a Stefan ZIMMER. Toothbrush abrasivity in a long-term simulation on human dentin depends on brushing mode and bristle arrangement. *PLoS ONE*. 2017, roč. 12, č. 2. ISSN 19326203.
- [51] GALLAGHER, Andrew, Joseph SOWINSKI, James BOWMAN, Kathy BARRETT, Shirley LOWE, Kartik PATEL, ; MARY, Lynn BOSMA a Jonathan E CREETH. *The Effect of Brushing Time and Dentifrice on Dental Plaque Removal in vivo*. 2009.

- [52] HOOPER, S, N X WEST, M J PICKLES, A JOINER, R G NEWCOMBE a M ADDY. Investigation of erosion and abrasion on enamel and dentine: a model in situ using toothpastes of different abrasivity Hooper S, West NX, Pickles MJ, Joiner A, Newcombe RG, Addy M: Investigation of erosion and abrasion on enamel and dentine: a model in situ using toothpastes of different abrasivity. *J Clin Periodontol*. 2003, roč. 30, s. 802–808 [vid. 16. červenec 2024].
- [53] TRITC I tdblabs.se. [vid. 23. březen 2025]. Dostupné z: <https://tdblabs.se/products/stand-alone-dyes/tritc/>
- [54] SCIMECA, Manuel, Simone BISCHETTI, Harpreet Kaur LAMSIRA, Rita BONFIGLIO a Elena BONANNO. Energy dispersive X-ray (EDX) microanalysis: A powerful tool in biomedical research and diagnosis. *European Journal of Histochemistry*. 2018, roč. 62, č. 1, s. 89–99. ISSN 20388306.
- [55] ČÍPEK, Pavel, Martin VRBKA, David REBENDA, David NEČAS a Ivan KŘUPKA. Biotribology of synovial cartilage: A new method for visualization of lubricating film and simultaneous measurement of the friction coefficient. *Materials*. 2020, roč. 13, č. 9. ISSN 19961944.
- [56] LEWIS, Roger a R. S. DWYER-JOYCE. Interactions between toothbrush and toothpaste particles during simulated abrasive cleaning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2006, roč. 220, č. 8, s. 755–765 [vid. 1. červenec 2024]. ISSN 13506501.
- [57] SCHERGE, Matthias, Sandra SAREMBE, Andreas KIESOW a Matthias PETZOLD. Dental tribology at the microscale. *Wear*. 2013, roč. 297, č. 1–2, s. 1040–1044. ISSN 00431648.
- [58] SAJEWICZ, Eugeniusz. Effect of saliva viscosity on tribological behaviour of tooth enamel. *Tribology International*. 2009, roč. 42, č. 2, s. 327–332 [vid. 30. srpen 2023]. ISSN 0301-679X.
- [59] BAGUS, Paul S., Eugene S. ILTON a Connie J. NELIN. *The interpretation of XPS spectra: Insights into materials properties*. 1. červen 2013. ISSN 01675729. Dostupné z: doi:
- [60] KRISHNA, D. Nanda Gopala a John PHILIP. *Review on surface-characterization applications of X-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Recent developments and challenges*. B.m.: Elsevier B.V. 1. prosinec 2022. ISSN 26665239. Dostupné z: doi:
- [61] SOUZA, Cíntia de Melo Silva, Letícia Oba SAKAE, Paula Mendes Acatauassú CARNEIRO, Renata Antunes ESTEVES a Taís SCARAMUCCI. Interplay between different manual toothbrushes and brushing loads on erosive tooth wear. *Journal of Dentistry*. 2021, roč. 105. ISSN 03005712.

- [62] BIZHANG, Mozhgan, Katharina RIEMER, Wolfgang H. ARNOLD, Julia DOMIN a Stefan ZIMMER. Influence of bristle stiffness of manual toothbrushes on eroded and sound human dentin - an in vitro study. *PLoS ONE*. 2016, roč. 11, č. 4. ISSN 19326203.
- [63] KYOIZUMI, Hideaki, Junji YAMADA, Toshimitsu SUZUKI, Masafumi KANEHIRA, Werner J. FINGER a Keiichi SASAKI. Effects of toothbrush hardness on in vitro wear and roughness of composite resins. *Journal of Contemporary Dental Practice*. 2013, roč. 14, č. 6, s. 1137–1144. ISSN 15263711.

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1: Prisma diagram.....	5
Obr. 2-2: Druhy výplňových materiálů [7].....	6
Obr. 2-3: Závislost modulu pružnosti na objemu plniva [9]	8
Obr. 2-4: Snímky abrazivních částic SEM: Al ₂ O ₃ – vlevo, zvětšeno 2,2kx, SiO ₂ vpravo, zvětšeno 1,7kx [18].....	13
Obr. 2-5:Povrchy skloviny po čištění (a, d), povrchy skloviny po demineralizaci (b, e), povrchy demineralizované skloviny po čištění (c, f) [21].....	15
Obr. 2-6: Časový průběh součinitele tření [21]	16
Obr. 2-7: Detail aglomerace částic na štětinách kartáčku při čištění [22]	16
Obr. 2-8: Porovnané účinnosti čištění pro měřená abraziva [25].....	19
Obr. 2-9: Porovnané hodnoty opotřebení pro měřená abraziva [25]	19
Obr. 2-10: Závislost účinnosti čištění na velikosti částic [27].....	19
Obr. 2-11: Porovnané hodnoty pH obou past, pomerančové šťávy [30].....	21
Obr. 2-12: Výsledné hodnoty opotřebení [30]	22
Obr. 4-1: Schéma postupů měření diplomové práce	28
Obr. 4-2: Tribometr Bruker UMT TriboLab [32].....	29
Obr. 4-3: Optický profilometr Contour GT-X Bruker [33].....	30
Obr. 4-4: Schéma metody skenovací interferometrie.....	30
Obr. 4-5: SEM MIRA3 Tescan (CEITEC), schéma principu skenovací elektronové mikroskopie [37]	31
Obr. 4-6: Detail fluorescenčního mikroskopu Nikon, schéma principu fluorescenční mikroskopie [38]	32
Obr. 4-7: Optický mikroskop Nikon, schéma principu optického mikroskopu [39].....	32
Obr. 4-8: Vzorek zubní výplně (a), UV lampa Ledex WL 090 (b), kompomerní materiál Dyract Flow Shade A2 (c) [40, 41]	33
Obr. 4-9: Použité zubní pasty [42–47].....	34
Obr. 4-10:Kartáček Curaprox 5480 Ultra Soft [48]	34
Obr. 4-11: Kontaktní dvojice s roztokem US a vybranou zubní pastou (a), reálná tribologická soustava (b).....	35

Obr. 4-12: Umístění vzorků v centrifuze MicroStar13 (a); vzorky zubních past ve zkumavkách po 2. centrifugaci (b): Elmex sensitive, Sensodyne EFRP, Colgate TW, Benjamínek, Weleda; vzorky na uhlíkových páskách pokryté zlatem (c).....	37
Obr. 4-13: Použité zubní pasty [42, 43, 44, 46, 47]	37
Obr. 4-14: Postup přípravy umělého zubního plaku na bázi 2 typů polysacharidů [Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT].....	38
Obr. 4-15: Příprava umělého zubního plaku: aparatura pro přípravu umělého zubního plaku (a), reaktor s připraveným umělým zubním plakem (b), výsledný zubní plak (c) [Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT].....	39
Obr. 4-16: Vzorky zubních výplní před nanesením plaku (a), aplikovaný umělý zubní plak (b) [Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT].....	39
Obr. 4-17: Vzorek s naneseným zubním plakem → nanesené 3% SPEICOPLAQUE barvivo [Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT]	40
Obr. 4-18: Stabilitní studie ve fyziologickém roztoku a US: vzorky zubních výplní s umělým zubním plakem v médiu na začátku měření (a, vlevo fyziologický roztok, vpravo US), vzorky zubních výplní s umělým zubním plakem po 2 hodinách měření (b, vlevo fyziologický roztok, vpravo US) [Pokročilé biomateriály, CEITEC VUT]	40
Obr. 4-19: Excitační a emisní spektra vlnových délek filtru TRITC [53]	42
Obr. 4-20: Krytí vzorku při simulovaném čištění pro získ referenčních hladin vzorku s detailem řezu a viditelnými rýhami opotřebení.....	43
Obr. 4-21: Skenovaný vzorek na optickém profilometru (a), povrch vzorku po odstranění šumu funkcí Mask Data (b), vyrovnaní povrchu vzorku funkcí Terms removal (c), Data restore funkce pro dopočet chybějících hodnot (d), vyhlazení Gaussovým filtrem (e), maskování neopotřeбенé plochy (f), plastové krytí vzorku opotřeбенé plochy s detaily opotřebení v x – řezu (g).....	44
Obr. 4-22: Schematicky znázorněný postup vyhodnocení vlastností a prvkového složení částic pomocí SEM	45
Obr. 4-23: Získ hodnot intenzit světla na fluorescenčním mikroskopu (a), účinnost čištění vyhodnocena jako směrnice úbytku (tangenta) hodnot intenzity v čase z lineárně klesající části grafu (b)	46
Obr. 4-24: Focení vzorku optickým mikroskopem (a), snímky po obrazové analýze v MATLABu (b), určení účinnosti čištění jako směrnice procentuálního úbytku plaku v čase (c).....	47
Obr. 5-1: Grafické zobrazení průměrných časových průběhů CoF se znázorněním přidání roztoku US se zubní pastou či pouze US (data byla získána jako průměrný časový průběh CoF ze tří měření pro každou pastu a pro US)	48

Obr. 5-2: Průměrné hodnoty CoF v počáteční (A), střední (B) a konečné (C) fázi pro měření se všemi pastami a US (výsledky časových průběhů CoF (Obr. 5-1) byly průměrovány ze tří měření do uvedených fází a zobrazeny jako průměr \pm SD)	49
Obr. 5-3: Průměrné objemové úbytky zubních past a US seřazené s klesajícími RDA (výsledky měřeny ve třech opakováních pro každou zubní pastu a US a uvedeny jako průměr \pm SD)	50
Obr. 5-4: Morfologie částic zobrazená pomocí SEM (Tescan MIRA3, Česká republika, zvětšení 500x: a) Colgate TW, b) Sensodyne EFRP, c) Herbadent, d) Elmex Sensitive, e) Weleda, f) Benjamínek)	51
Obr. 5-5: Morfologie částic zobrazená pomocí SEM (Tescan MIRA3, Česká republika, zvětšení 5kx: a) Colgate TW, b) Sensodyne EFRP, c) Herbadent, d) Elmex Sensitive, e) Weleda, f) Benjamínek)	51
Obr. 5-6: Vyhodnocení hmotnostního složení prvků z bodových EDS analýz všech past (výsledky jsou zobrazeny jako průměr ze 3-4 hodnot \pm SD))	52
Obr. 5-7: Průměrné hodnoty velikostí abrazivních částic pro všechny zubní pasty (výsledky jsou zobrazeny jako průměr ze 100 hodnot \pm SD)	53
Obr. 5-8: Fluorescenční analýza – úbytek intenzity světla v čase (výsledné křivky jsou zobrazeny jako průměr ze tří měření \pm SD)	54
Obr. 5-9: Fluorescenční analýza: proložení polynomem pro vyhodnocení směrnic úbytku intenzit světla v čase	55
Obr. 5-10: Optické snímky povrchu vzorku s naneseným obarveným plakem: Před začátkem experimentu (vlevo), po 20 s měření (uprostřed), po 100 s měření (vpravo) ..	55
Obr. 5-11: Postup výpočtu směrnic pro úbytky intenzit světla v čase	56
Obr. 5-12: Analýza obrazu zubní pasty Sensodyne EFRP s vybranými procentuálními úbytky plaku obrazovou analýzou v MATLABu	57
Obr. 5-13: Obrazová analýza: procentuální úbytek plaku v čase (výsledky jsou zobrazeny jako průměr ze tří měření \pm SD)	57
Obr. 5-14: Obrazová analýza – proložení křivek lineární přímkou pro získání směrnic procentuálního úbytku plaku	58

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1: Počty studií rešeršních dotazů pro vybrané databáze	4
Tabulka 2-2: Vliv vlastností abrazivních částic na opotřebení zubních povrchů [12].....	11
Tabulka 2-3: Hodnoty RDA a úrovně opotřebení [1].....	12
Tabulka 2-4: Porovnání drsností a hloubek opotřebení pro abrazivní částice CaCO ₃ a SiO ₂ po čištění 30 s bez namočení do sladkého nápoje, ihned po namočení a po máčení po dobu jedné hodiny [19]	14
Tabulka 2-5: Porovnání procentuálního množství odstraněného plaku po 400 a 600 cyklech čištění a množství opotřebené skloviny po 4 týdnech čištění [23]	17
Tabulka 2-6: Porovnání hodnot účinnosti čištění po 400 a 800 cyklech kartáčku [24] ...	18
Tabulka 2-7: Porovnání hodnot opotřebení po 400 a 800 cyklech kartáčku	18
Tabulka 4-1: Prvky tribologické soustavy pro měření opotřebení	34
Tabulka 4-2: Podmínky pro simulaci čištění na tribometru pro vyhodnocení opotřebení	36
Tabulka 4-3: Prvky tribologické soustavy pro měření účinnosti čištění	38
Tabulka 4-4: Podmínky pro simulaci čištění na tribometru pro vyhodnocení účinnosti čištění	41
Tabulka 5-1: Shrnující tabulka abrazivních částic a jejich vlastností	53
Tabulka 5-2: Hodnoty směrníc úbytků intenzit světla v čase vyhodnocených fluorescenční analýzou	56
Tabulka 5-3: Hodnoty směrníc procentuálních úbytků plaku v čase vyhodnocených obrazovou analýzou	58
Tabulka 5-4: Výpočet příznivosti pasty z výsledků účinnosti fluorescenční analýzou	59
Tabulka 5-5: Výpočet příznivosti pasty z výsledků účinnosti obrazovou analýzou	60