

Univerzita Karlova
1. lékařská fakulta
Autoreferát disertační práce



UNIVERZITA KARLOVA
1. lékařská fakulta

MUDr. Michal Bumbálek
Hodnocení vlastností NiTi nástrojů v současné endodoncii

Praha, 2021

Doktorské studijní programy v biomedicině
Univerzita Karlova a Akademie věd České republiky

Obor: Experimentální chirurgie

Předseda oborové rady: Prof. MUDr. Zdeněk Krška, DrSc.

Školící pracoviště: Stomatologická klinika VFN a 1. LF UK

Školitel: MUDr. et MUDr. Karel Klíma, PhD.

Obsah

Obsah.....	3
1 Úvod.....	6
2 Cíl práce.....	7
3 Popis řešení a výsledky výzkumu.....	8
3.1 Návrh testovacího přípravku.....	8
3.2 Zkoušky únavové životnosti.....	11
3.2.1 Vliv rychlosti otáčení nástroje.....	11
3.2.2 Při různém zakřivení umělého kořenového kanálku.....	12
3.2.3 Při různých typech rotačního pohybu.....	15
3.2.4 Vliv počtu sterilizací nástrojů.....	16
3.2.5 Vliv aplikace plazmové nitridace.....	17
4 SEM analýza hodnocení povrchu kanálků.....	25
5 Závěr.....	28
6 Seznam použité literatury.....	30
7 Seznam obrázků.....	31
8 Seznam tabulek.....	31
Seznam publikací doktoranda.....	32

Abstrakt

Úvod: Nekróza a gangréna zubní dřeně je komplikací a progresí zubního kazu. Odstranění infikované tkáně v rámci endodontického ošetření představuje jedinou možnost záchrany zubu. Jedním ze základních předpokladů kvalitního endodontického ošetření je použití endodontických NiTi nástrojů pro strojové opracování kořenových kanálků. Cílem této disertační práce je zhodnotit vliv jednotlivých faktorů, které při klinickém ošetření kořenových kanálků ovlivňují životnost endodontických nástrojů. V práci bude hodnocen vliv zakřivení kanálků, tvar průřezu nástroje, rychlost a typ otáčení a vliv sterilizace. Zároveň bude v disertační práci zkoumán vliv nízkoteplotní plazmové nitridace na únavovou životnost nástroje.

Materiály a metodika:

Bylo zkoumáno několik endodontických systémů pro strojové opracování kořenových kanálků. Výzkum se věnoval zejména cyklické únavě rotačních endodontických nástrojů, kdy byly nástroje otáčeny v umělých zakřivených kořenových kanálcích. Dále byl posuzován vliv sterilizace na životnost nástrojů, a v poslední řadě byly nástroje upraveny pomocí tepelné plazmové nitridace za účelem zlepšení jejich vlastností. Nástroje byly následně analyzovány pomocí SEM mikroskopu a mikrotvrdoměru.

Výsledky:

Při testování cyklické únavy v umělých kořenových kanálcích o poloměru R3 a R5 bylo zjištěno, že nástroje s vyšší tuhostí (čtvercový průřez, trojúhelníkový průřez) je vhodné používat na opracování přímých nebo málo zahnutých kořenových kanálků. Pro velmi zahnuté kořenové kanálky je vhodné používat nástroje s nižší tuhostí (S tvar). Výsledky experimentu také potvrdili, že proces nízkoteplotní plazmové nitridace je schopen na nikl titanových nástrojích vytvořit vrstvu nitridů. Při zkouškách cyklické životnosti se ukázalo, že proces plazmové nitridace je schopen zvýšit cyklickou únavovou životnost nástrojů.

Závěr:

K dnešnímu dni stále neexistuje endodontický nástroj schopný splnit všechny požadavky optimální přípravy kořenového kanálku. Nové materiály a studie by měly být vyvinuty v pokračování hledání systému, který dokáže kombinovat účinnost a bezpečnost v endodontické instrumentaci.

Klíčová slova:

Endodoncie, cyklická únava, NiTi nástroje, austenitická NiTi slitina, martenzitická NiTi slitina, superelastická, únavové selhání, kořenový kanálek

Abstract

Introduction:

One of the key prerequisites of high-quality endodontic treatment is the use of endodontic NiTi instruments for the preparation of root canals. The purpose of this dissertation is to evaluate the effect of individual factors which influence the life of endodontic instruments during the clinical treatment of root canals. The dissertation will evaluate the effect the curvature of the canals, the shape of the tip of the instrument, the speed and type of rotation, and the influence of sterilization. The effect of low-temperature plasma nitriding on the fatigue life of the instruments will also be investigated.

Materials and methods:

Several endodontic systems used for the machine preparation of root canals were studied. The study focused predominantly on the cyclic fatigue of rotary endodontic instruments, wherein the files were rotated in artificial curved root canals. Additionally, the influence of sterilization on the life of the instruments was also examined. Finally, the instruments were treated using thermal plasma nitridation for the purpose of improving their properties. The instruments were then analyzed using a scanning electron microscope and a microhardness meter.

Results:

Testing cyclic fatigue in artificial root canals with radii R3 and R5 revealed that instruments with a higher hardness (square profile, triangular profile) are suited for use in preparing straight or slightly curved root canals. For strongly curved root canals, the use of less hard instruments (S shape) is suitable. The results of the experiment also confirmed that the process of low-temperature plasma nitriding is capable of creating a nitride layer on nickel titanium instruments. Tests of cyclic fatigue showed that the process of plasma nitriding is capable of increasing the cyclic fatigue life of instruments.

Conclusion:

Currently, there exists no endodontic instrument capable of fulfilling all requirements for the ideal preparation of root canals. New materials should be produced and studies conducted in the continuing search for a system which could combine effectiveness and safety in endodontic instrumentation.

Key words:

Endodontics, cyclic fatigue, NiTi instruments, austenitic NiTi alloy, martensitic NiTi alloy, superelasticity, fatigue failure, root canal

1 Úvod

Stomatologie je jedním ze základních oborů medicíny a její důležitost, stejně jako důležitost jejich jednotlivých subdisciplín, s postupem času nabývá na významu ve většině rozvinutých zemích celého světa. První zmínky o zubních zákrocích lze datovat již do období před zhruba 10 tisíci lety a v současné době představuje dentální věda jednu z podstatných složek lékařského odvětví. Život většiny obyvatel vyspělých zemí je spojen s pravidelnou stomatologickou péčí a péče o zuby by měla být považována za samozřejmost.

Termín endodoncie, který bude v rámci této práce často zmiňován, vychází ze spojení řeckých slov „endos“, jež je možné do českého jazyka přeložit jako „uvnitř“ a druhého slova „odus“ neboli „zub“. Endodoncie představuje specializované odvětví zubního lékařství, které se zajímá o zubní dřev a tkáň zubních kořenových kanálků. Mezi nejčastější zákroky těchto specializovaných stomatologických ošetření patří opracování kořenových kanálků, periapikální chirurgie, léčba fraktur zubů nebo péče o zub poškozený následkem úrazu. Endodoncie představuje odvětví zubního lékařství, které je nezbytné pro záchranu zubu při jeho různých nemocech či po jeho úrazech.

Proces léčby konkrétního zubu nazýváme endodontickým ošetřením, které je potřeba provést vždy, když dojde v zubní dřevě k patologickému procesu, tedy zánětu nebo odumření, ať už následkem příliš velkého zubního kazu, nebo po úrazu. Právě na základě endodontického ošetření zubu, lze předejít úplné extrakci nemocného či mrtvého zubu, a i mrtvý zub může nadále setrvat v dutině ústní, kde bude plnit svou stávající funkci.

V současné době je navíc běžnou praxí, že endodontické ošetření zubu bývá zcela bezbolestné, a to díky již běžně používaným lokálním anestetikům. Cílem endodontického ošetření je především předejít trvalé ztrátě zubu, a předcházet a poté i léčit bolestivá onemocnění zubů, a ulevit tak jejich majitelům od bolesti [Peřinka et al., 2009].

Je však nutné si uvědomit, že endodontické ošetření nemocného kořenového kanálku nejen, že předchází bolestem nebo samotné ztrátě zubu, ale jedná se i o nutné ošetření, které předchází závažnějším potencionálním problémům. Nejčastějším zdrojem infekce přinášejícím závažné problémy jsou následky zubního kazu.

Relativně benigní zánět zubní dřevě (pulpitis) může přejít až k životu ohrožujícímu stavu, jakým je bezpochyby mediastinitis (z 50 % smrtelný). Primární příčinou je současné nejrozšířenější infekční onemocnění – zubní kaz (caries dentis), potažmo tedy mikroorganismy, které jej vyvolávají. První zánětlivou komplikací zubního kazu je právě zánět zubní dřevě.

V případě, že se včas nezaléčí, přechází přes stadium gangrény v zánět periodontia, akutní periodontitis acuta nebo periodontitis chronica, která ovšem může akutně vzplanout do podoby periodontitis exacerbans. Nastane-li situace, že není ani v této fázi adekvátně léčen, je zánět šířen skrze spongiózu čelistních kostí až pod periost. To se již jedná o periostitis, která je značně bolestivá až do chvíle, kdy dojde k perforaci periostu a přesunu k další fázi, kterou je abscessus submucosus. V této chvíli nastává spontánní evakuace abscesu píštělí. Problémem se však stává, pokud se fistula nevytvoří nebo nestačí odvádět exsudát dostatečně rychle vzhledem k jeho novotvorbě. V závislosti na lokalizaci postiženého zubu pak může docházet k šíření zánětu, exsudát proniká na vnitřní stranu mandibuly a šíří se směrem k jazyku, dorzálně do podčelistního prostoru. Následkem tohoto stavu je ztížené polykání a dýchání, ale nelze vyloučit ani udušení, pokud není včas zahájena adekvátní terapie [Iqbal, 2021].

V krajním případě mohou bakterie a šířící se zánět vyvolat endokarditidu. Infekční endokarditida je zánět vnitřního povrchu srdce neboli endokardu, který je způsobený mikroorganismy a postihuje zejména srdeční chlopně [Parahitayawa et al., 2009]. Patří mezi

závažná onemocnění srdečního orgánu, při kterém je napadena vnitřní část srdce infekčními mikroby. Pokud zánět postihne i srdeční chlopně, může významným způsobem narušit jejich strukturu a fungování srdce jako takového. Tento životu nebezpečný zánět srdečního svalu může být právě způsoben zubními mikroby, kteří se z napadeného zánětlivého zubu dostanou do krevního řečiště a kolonizují endokard [Herzberg, 1979].

Endodontické ošetření je velmi náročné na přístrojové vybavení, kvalitní nástroje i na kvalitu používaných materiálů. Mezi v současné době již klasicky využívané přístroje endodontických ordinací patří kvalitní rentgenové a ultrazvukové přístroje, a operační mikroskopy.

2 Cíl práce

V oblasti ošetření kořenových zubních kanálků je v dnešní době velká pozornost věnována nikl titanovým nástrojům. Použití těchto nástrojů pro jejich vynikající mechanické vlastnosti a tvarovou paměť se v dnešní době stalo již standardem. Díky nástrojům z těchto materiálů se mohou v klinické praxi relativně bezpečně a s jistotou ošetřovat kořenové kanálky. Použití těchto nástrojů v zahnutých kořenových kanálcích vede k deformaci nástroje a k riziku zalomení nástroje v kořenovém kanálku.

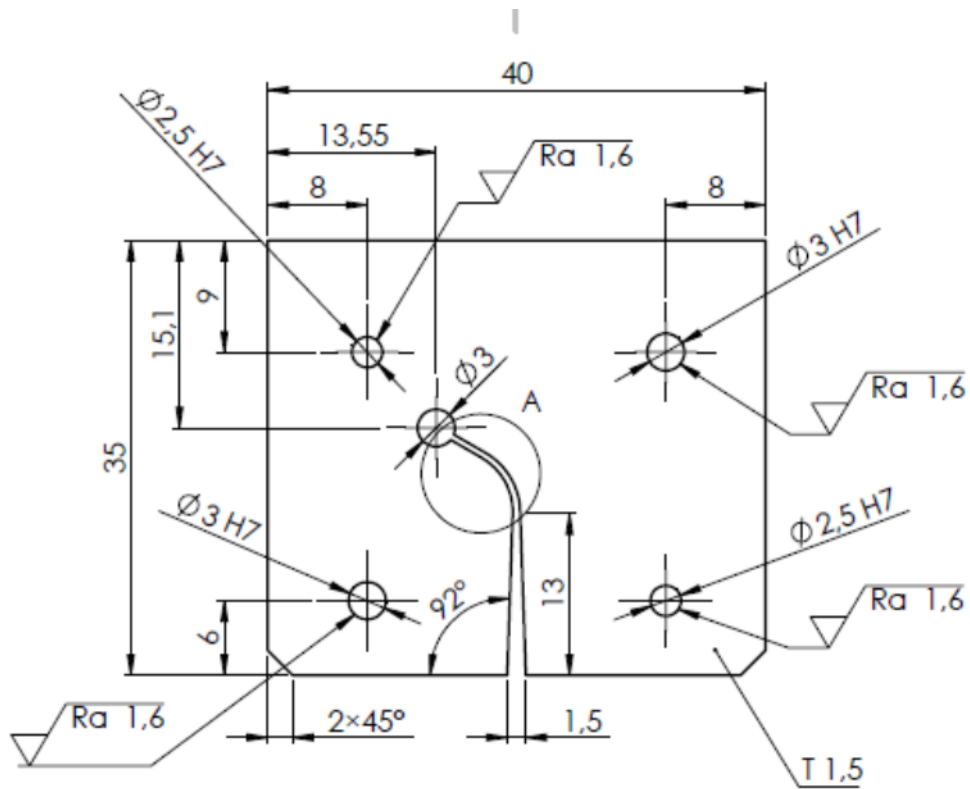
Cílem této disertační práce je zhodnotit vliv jednotlivých faktorů, které při klinickém ošetření kořenových kanálků ovlivňují životnost endodontických nástrojů. V práci bude hodnocen vliv zakřivení kanálků, tvar průřezu nástroje, rychlost a typ otáčení a vliv sterilizace. Zároveň bude v disertační práci zkoumán vliv nízkoteplotní plazmové nitridace na únavovou životnost nástroje.

3 Popis řešení a výsledky výzkumu

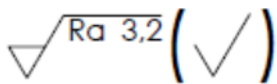
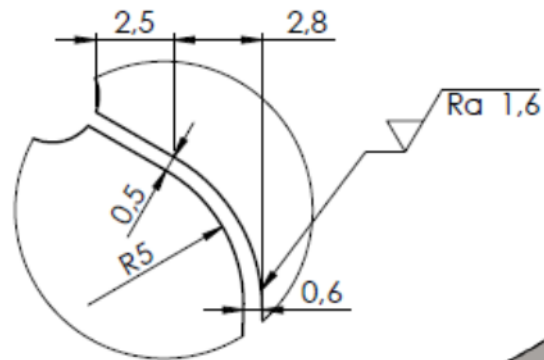
Pro testování cyklické únavové životnosti dentálních NiTi nástrojů se používají nejčastěji umělé kanálky, které simulují zahnuté kořenové kanálky zubu. Tyto kanálky jsou vyrobeny z nejrůznějších materiálů od skleněných trubiček různých průměru po speciálně tvarované kanálky vytvořené v bločcích z korozivzdorné oceli. Pro testování cyklické únavy bylo čerpáno z literatury a byly zvoleny tvary kanálků, které byly použity v této publikaci [Plotino et al., 2009].

3.1 Návrh testovacího přípravku

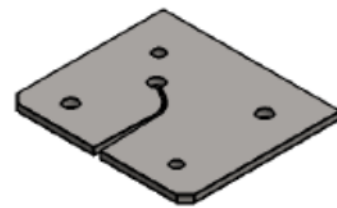
V experimentu byly použity 2 různé druhy zaoblení R5 a R3 v apikální části zubu. Výrobní výkresy navržených kanálků byly zpracovány v programu CAD Solidworks, v přiložených obrázcích jsou zobrazeny výrobní výkresy těchto kanálků. Po vytvoření výkresů byly kanálky vyrobeny z bločku z korozivzdorné oceli AISI 410 pomocí technologie řezání odporovým drátem. Takto vyrobený kanálek byl pomocí kolíků a šroubů s kuželovou hlavou připevněn na podložku a takto sestavený bloček byl používán pro testování.



DETAIL A
MÉRITKO 5 : 1

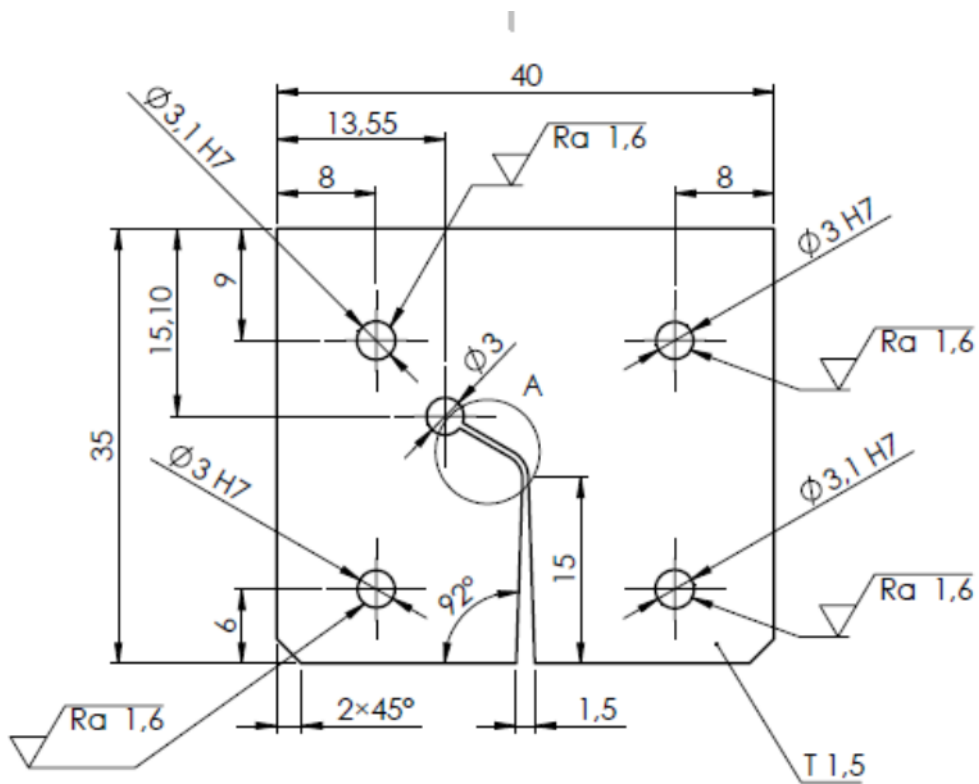


Nekótovaná zkosení 0,1×45°

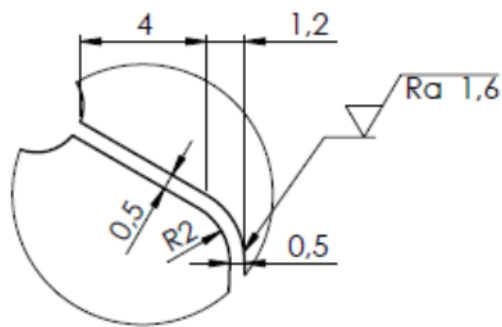


Obrázek 1 - Výrobní výkres kanálku s poloměrem zaoblení R5

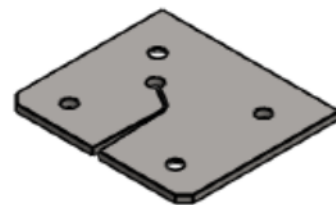
Zdroj: vlastní



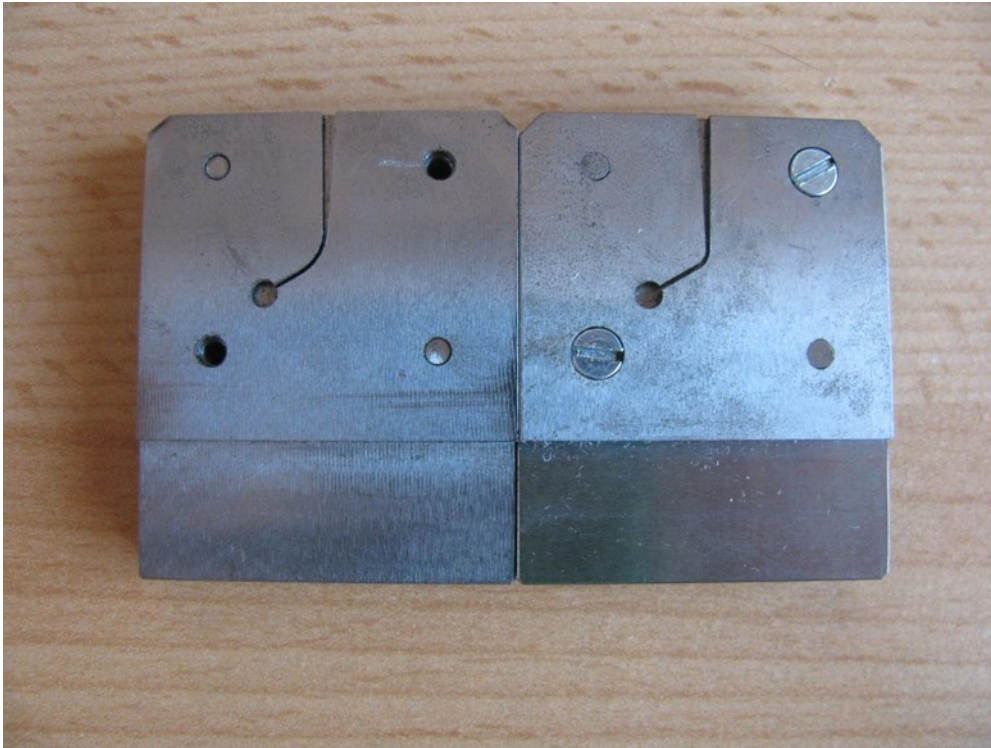
DETAIL A
MÉRITKO 5 : 1



∇ Ra 3,2 (\checkmark) Nekótovaná zkosené 0,1×45°



Obrázek 2 - Výrobní výkres kanálku s poloměrem zaoblení R3
Zdroj: vlastní



Obrázek 3 - Vyrobené testovací bločky pro hodnocení cyklické únavy

Zdroj: vlastní

3.2 Zkoušky únavové životnosti

Experimentální testování únavové životnosti bylo provedeno v několika krocích, které jsou dále popsány v jednotlivých kapitolách. Cílem testování bylo experimentálně ověřit únavovou životnost Ni-Ti nástrojů při různých podmínkách zatížení. Pro testování byl zvolen vliv počtu sterilizací, vliv tvaru nástroje, vliv rychlosti otáčení. Experimenty jsou popsány v jednotlivých podkapitolách.

Všechny provedené experimenty byly provedeny jednou osobou. Všechny experimenty měly stejný postup při zasunování NiTi nástroje do umělého kanálku. Nástroj byl do umělého kanálku, který byl přikryt průhlednou plastovou destičkou, zasunut po konce vinutí šroubovice. Po zasunutí byly nástroje otáčeny v kanálku a na stopkách byl měřen čas do lomu. Po ulomení konce nástroje byl experiment ukončen. Po ukončení zkoušky byl zlomený nástroj vyjmut z endomotoru.

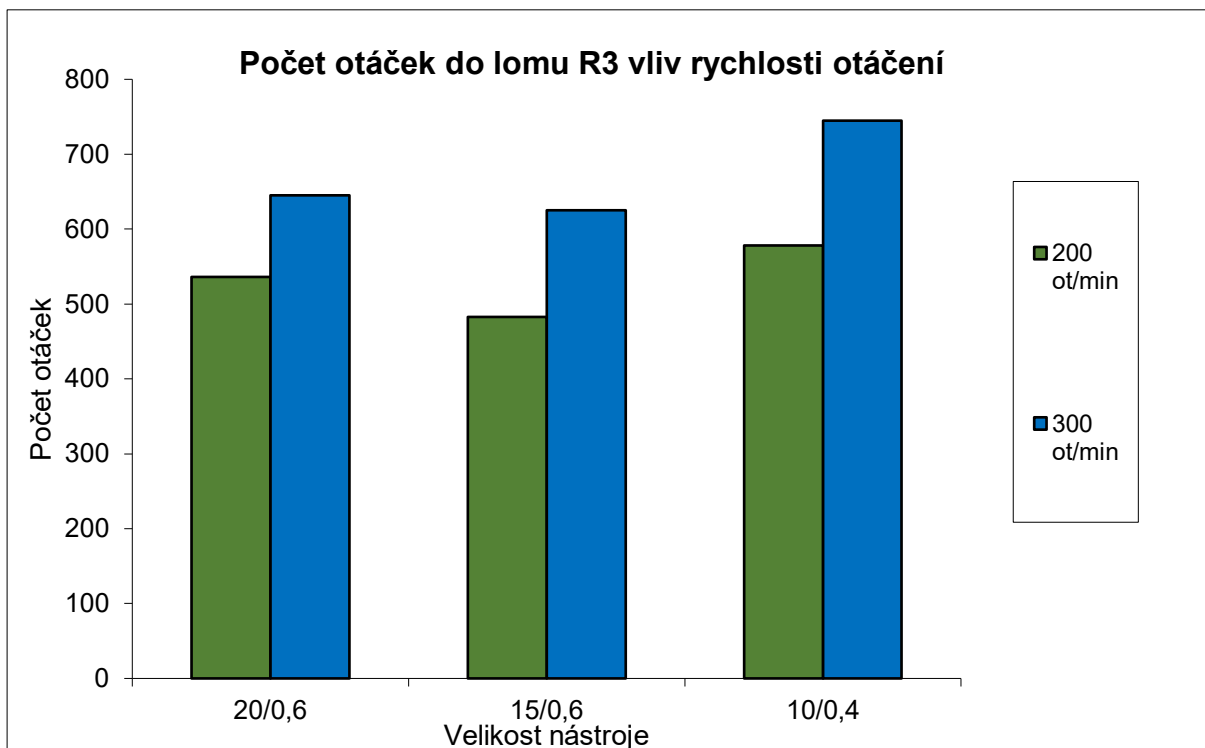
Pro všechny experimenty byl použit stejný endomotor Endo a class reciprocating LED, Medin, Česká republika. Otáčky byly nastaveny různě dle podmínek testování. Maximální torzní moment nástroje byl 4 Ncm.

3.2.1 Vliv rychlosti otáčení nástroje

Tento experiment byl proveden na celkem 30 kusech použitých nástrojů Mtwo, 10ks od každé velikosti, které byly reciprokačně rotovány v umělém kanálku o poloměru R3. Pro tento experiment byly zvoleny velikosti nástrojů (10/.04, 15/.05, 20/.06) a byly zvoleny

2 rychlosti otáčení 200 ot. / min. a 300 ot. / min. Otáčky 200 ot. / min. byly zvoleny jako standardní, které jsou nejčastěji používány v klinické praxi a otáčky 300 ot. / min. byly zvoleny jako alternativa, která by mohla snížit čas ošetření kanálku. Zkouška životnosti byla provedena na použitých nástrojích firmy Mtwo.

Výsledky jsou uvedeny na obr. 4. Z hodnot je patrné, že i přes to, že byl zvolen umělý kanálek s poloměrem zaoblení 3 mm, při reciprokačním pohybu nejsou hodnoty tak výrazné mezi nástroji. Při otáčkách 200/min se životnost nástrojů lišila velmi málo, hodnoty byly v rozmezí 100 otáček. Při zvýšení rychlosti otáčení se počty otáček do lomu zvyšují. Nejvíce se zvýší hodnoty u nástroje 10/0,4, který je nejvíce flexibilní.



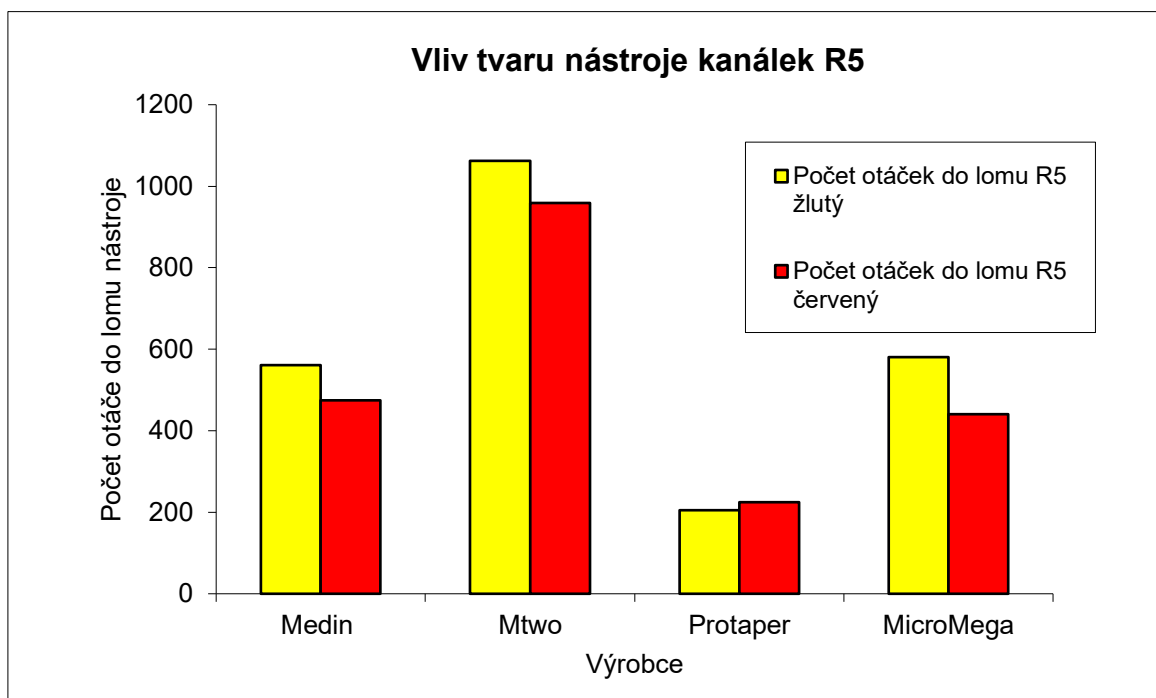
Obrázek 4 - Vliv otáček na životnost nástroje

Zdroj: vlastní

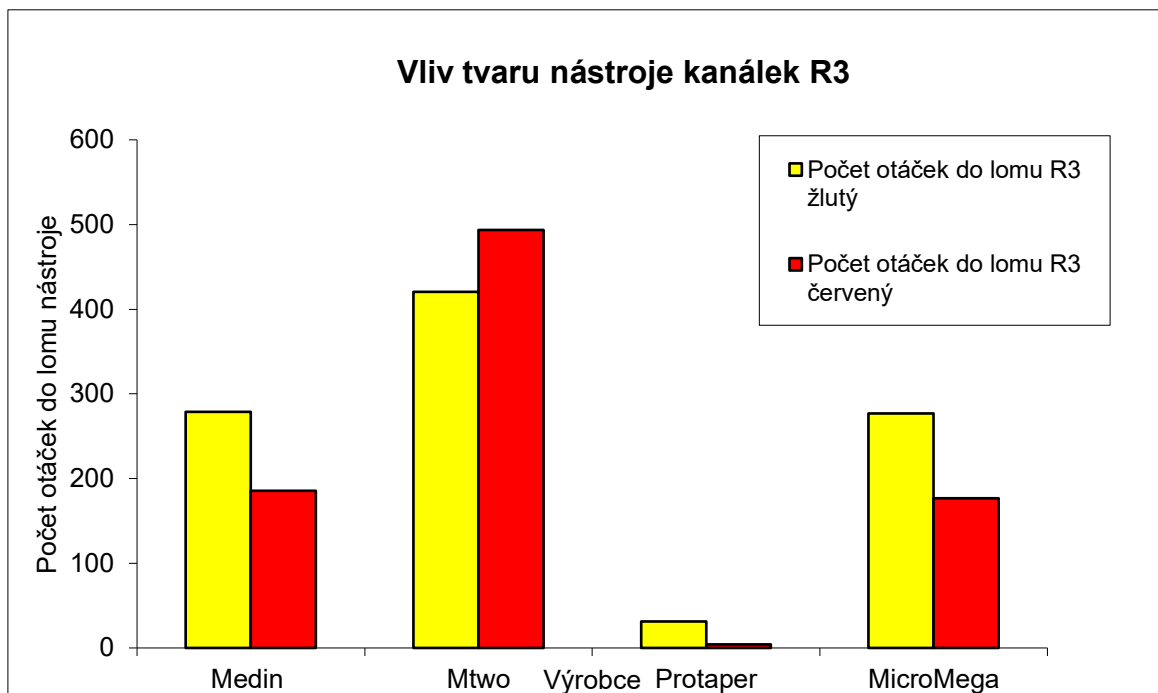
3.2.2 Při různém zakřivení umělého kořenového kanálku

Tento experiment byl proveden na nástrojích od 4 různých výrobců Wizard Navigator (Medin, Nové Město na Moravě, Czech Republic); Mtwo (Sweden and Martina, Padova, Italy); Revo-S (Micro-Mega, Besancon, France); a ProTaper (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Switzerland). Nástroje byly testovány v umělých kanálcích o poloměru R5 a R3. NiTi nástroje ProTaper byly rozděleny na 2 skupiny. Skupina 1, která se skládala ze 17 nástrojů F1 o velikosti 20/.07 (žlutá barva) a 18 nástrojů F2 o velikosti 25/.08 (červená barva); Mtwo 17 nástrojů o velikosti 20/.06 taper (žlutá barva) and 17 nástrojů o velikosti 25/.06 (červená barva); Wizard Navigator 20 nástrojů označení W-3 o velikosti 20/.06 (žlutá barva) and 20 nástrojů W-4 o velikosti 25/.06 (červená barva); a Revo-S 15 nástrojů o velikosti 20/.04 (žlutá barva) and 18 nástrojů o velikosti 25/.06 (červená barva). Všechny

nástroje byly nové o pracovní délce 25 mm. Celkem 73 nástrojů bylo testováno v umělém kanálku s poloměrem zaoblení 3 mm a 69 nástrojů bylo testováno v umělém kanálku s poloměrem zaoblení 5 mm. Všechny 142 nástrojů bylo před experimentem nejprve zkontrolováno pod mikroskopem, zda nejsou na povrchu přítomny viditelné defekty nebo deformace.



Obrázek 5 - Počet otáček do lomu nástroje umělý kanálek R5
Zdroj: vlastní

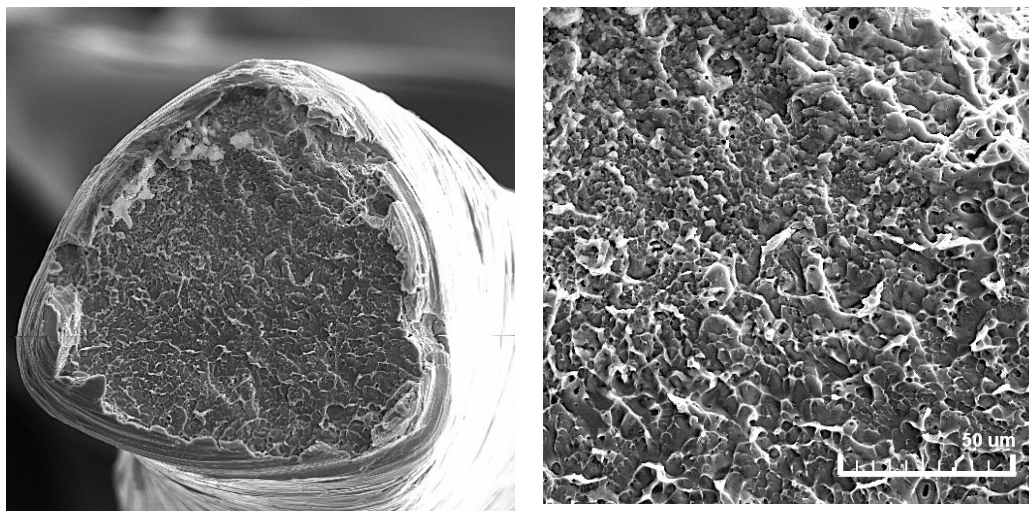


Obrázek 6 - Počet otáček do lomu nástroje umělý kanálek R3

Zdroj: vlastní

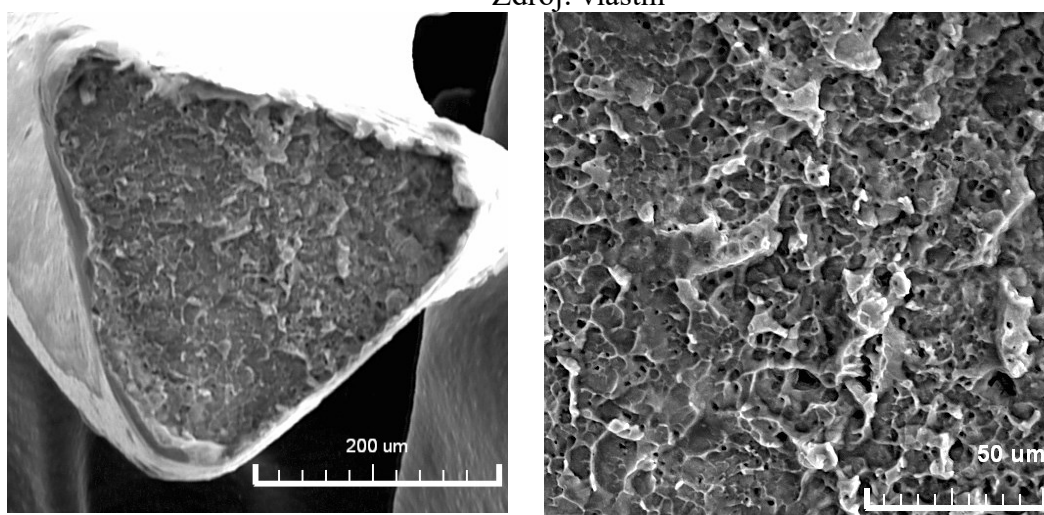
Z grafů na obrázcích je patrné, že vliv tvaru nástroje má výrazný vliv na únavovou životnost nástroje. V obou případech dosáhl nejvyššího počtu otáček do lomu nástroj Mtwo, která dosáhl o téměř třetinu vyšších hodnot než nástroje firmy Medin a Micromega. U nástroje Protaper se ukázalo, že v kanálku s poloměrem R3 není možné s nástrojem rotovat a k lomu dojde téměř okamžitě. Z těchto výsledků lze vyvodit závěr, že při opracovávání kořenových kanálků by se mělo přihlížet na tvar nástroje, kterým kořenový kanálek opracováváme a přizpůsobit typ a tvar nástroje dle tvaru kořenového kanálku. Toto je velmi dobře vidět na opracování zahnutých kořenových kanálků, kde vidíme z grafu vyšší odolnost nástroje Mtwo, než nástroje Protaper, což koresponduje s jejich tvarem.

U nástrojů Wizzard (Medin, ČR), Revo S (MicroMega) bylo na elektronovém mikroskopu Tescan VEGA 5135 provedena analýza lomových ploch. U všech nástrojů při nižším zvětšení (300x) je patrné, že lom je tvárný a k počátku šíření trhliny začalo docházet na povrchu nástroje, kde se trhlina poté šířila po hranicích zrn. Na obrázcích při větším zvětšení (1000x) je dobře patrný jamkový reliéf povrchu lomu, který potvrzuje to, že se trhlina šířila po hranicích zrn.



Obrázek 7 - Lomové plochy nástroje Wizard Navigator

Zdroj: vlastní

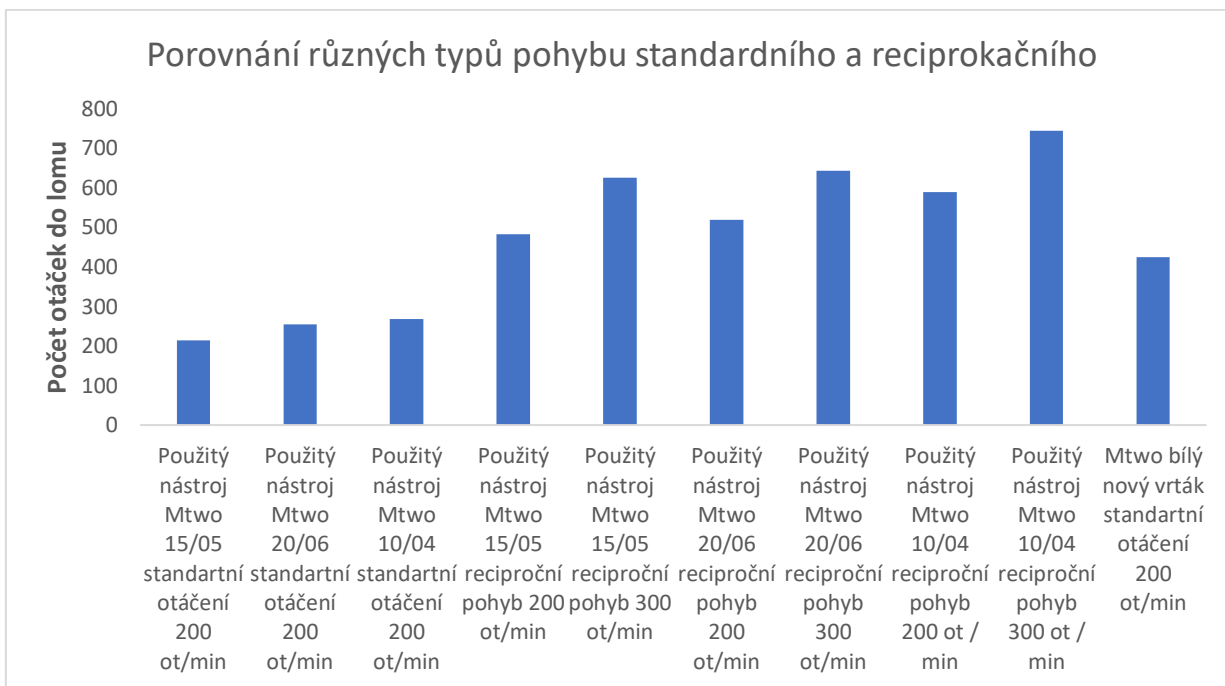


Obrázek 8 - Lomové plochy nástroje Revo S

Zdroj: vlastní

3.2.3 Při různých typech rotačního pohybu

V experimentu, kdy byla hodnocena únavová životnost nástroje, kdy se porovnávaly různé typy rotačního pohybu, byly porovnávány použité nástroje Mtwo. Pro porovnání byly použity nástroje, které se standartně otáčely při otáčkách 200 ot. / min. a nástroje, které se otáčely stejnou rychlostí reciprokačním pohybem. Z obr. 9 je dobře vidět, že reciprokační pohyb má velmi výrazný vliv na únavovou životnost nástroje, kdy u všech velikostí nástroje jsou hodnoty otáček do lomu dvojnásobné s velmi podobným trendem zvyšování životnosti jako u standardních otáček. Z výsledků tohoto experimentu můžeme vyvodit závěr, že vliv reciprokačního pohybu je významný, a dokáže nám prodloužit životnost nástroje dvojnásobně.



Obrázek 9 - Počet otáček do lomu – vliv způsobu otáčení
Zdroj: vlastní

3.2.4 Vliv počtu sterilizací nástrojů

V tomto experimentu se porovnávaly hodnoty nových nástrojů a nástrojů, které byly vyřazovány z klinického použití při dosažení 6 sterilizací. V rámci experimentu byly porovnávány nástroje Mtwo, které byly standartně rotovány v umělém kanálku s poloměrem 3 mm. Pro porovnání byly použity nástroje Mtwo velikostí 20/06 a 15/05. Výsledky jsou uvedeny na následujícím obrázku obr. 10.



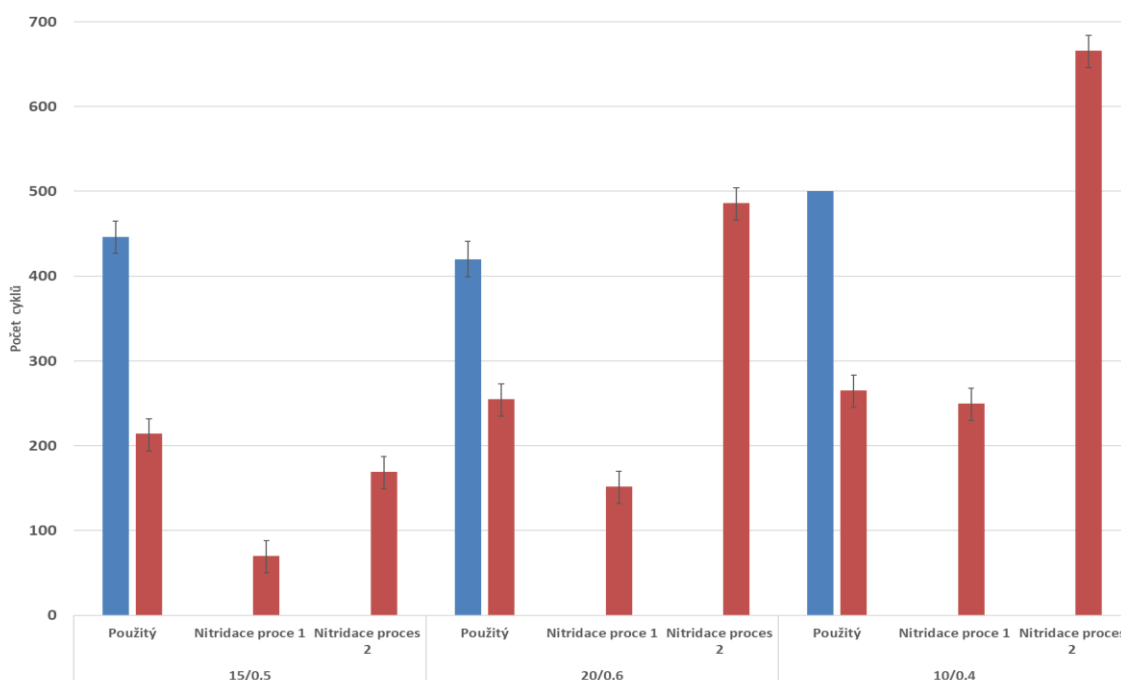
Obrázek 10 - Počet otáček do lomu – vliv sterilizace

Zdroj: vlastní

Z grafu obrázku je vidět, že únavová životnost po 4 sterilizacích klesá na polovinu oproti novému nástroji. Tento výsledek je důležitý pro zjištění jak nejspíše má výrobce nastaven koeficient bezpečnosti, tak aby nedošlo k nežádoucímu zalomení konce nástroje při ošetřování.

3.2.5 Vliv aplikace plazmové nitridace

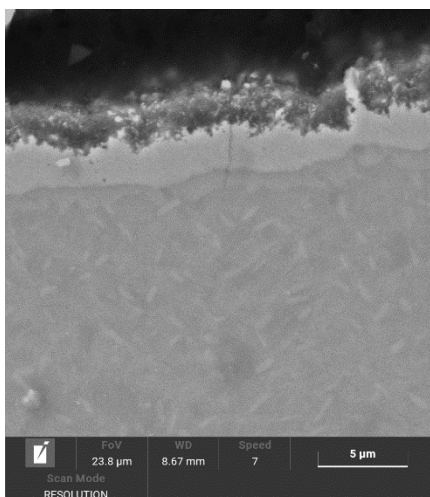
Jako poslední byl proveden experiment s cílem zvýšení únavové životnosti NiTi nástrojů plazmovou nitridací. Povrch NiTi slitin je možno využít tento způsob chemicko-tepelného zpracování, ovšem je nutné nitridovat při vysokých teplotách, které přesahují 600 °C. Ovšem v případě plazmové nitridace se pohybujeme v teplotách, kdy dosáhneme maximálně 590 °C. V rámci experimentu vycházíme z předpokladu, že plazma generovaná na povrchu nástroje jej ohřívá, a protože je nástroj velmi tenký, tak se díky tomu ohřeje na vyšší teplotu, než je teplota komory. Pro tento experiment bylo využito zařízení PN 60/60 firmy Rubig. Byly zvoleny 2 nitridační procesy. Proces 1 byla zvolena nízká teplota nitridace 470 °C a krátký nitridační čas 4 hod a proces 2, kdy byla zvolena vysoká teplota nitridace 550 °C a dlouhý nitridační čas. Nitridační atmosféra byla 90 % N₂ a 10 % H₂. Podíl vodíku byl minimalizován na spodní hranici z důvodu jeho nežádoucích účinků, kdy může způsobovat křehkost materiálu. Výsledky experimentu cyklické únavy jsou ukázány na obr. 11.



Obrázek 11 - Porovnání únavové životnosti po plazmové nitridaci

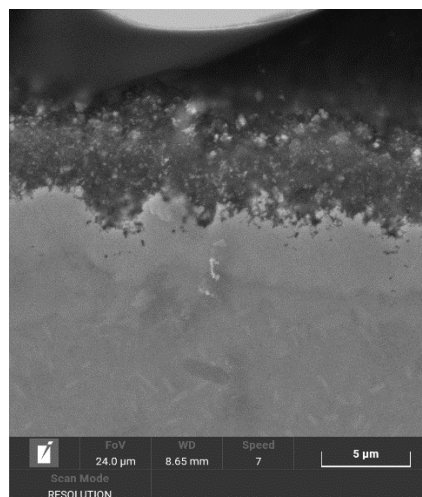
Zdroj: vlastní

Z grafu na obrázku je vidět, že hodnoty po plazmové nitridaci u procesu 1 u nástrojů velikosti 15/05 a 20/06 se únavová životnost nástrojů snížila, a v případě nástrojů 10/04 zůstala na přibližně stejné úrovni. Plazmová nitridace u procesu 2 u nástrojů velikostí 10/04 a 20/06 se únavová velikost výrazně zvýšila, dokonce nad úroveň hodnot nových nástrojů. U nástroje 15/05 po procesu 2 se lehce snížila. Tento úvodní experiment ukázal příslib do dalšího výzkumu, kdy se plazmová nitridace bude aplikovat na nové nepoužité nástroje.



Obrázek 12 – Nitridovaná vrstva na NiTi nástroji velikosti 20/.06 po plazmové nitridaci 470 °C, 4 hodiny.

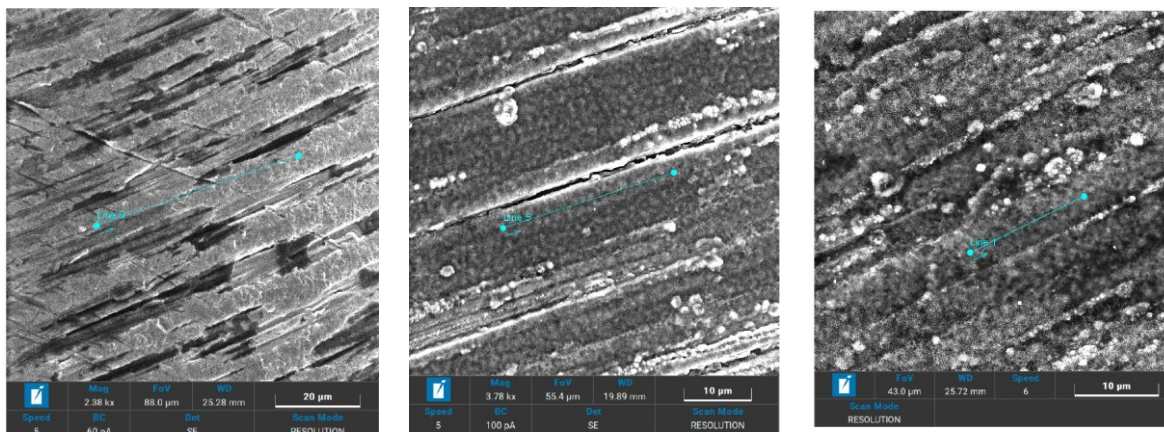
Zdroj: vlastní



Obrázek 13 – Nitridovaná vrstva na NiTi nástroji velikosti 20/.06 po plazmové nitridaci 550 °C, 20 hodin.

Zdroj: vlastní

U nástrojů byla provedena metalografická analýza pro zjištění, jak hluboká vrstva se na povrchu nástroje vytvořila. Na obrázku 12 je zobrazena nitridovaná vrstva, která vznikla po procesu 1, skládala ze 2 vrstev a dosahovala tloušťky 6 μm . Na povrchu nitridovaných nástrojů byla provedena EDS analýza povrchu. Na obr. 14 jsou vidět porovnání povrchů před a po plazmové nitridaci. Z obrázku je vidět rozdíl, kdy na nezpracovaném povrchu jsou vidět podélné stopy po broušení nástroje, na obrázku 14b jsou vidět kulovité částice nitridů na povrchu nástroje, které se na obrázku 14b vyskytují v menší míře než na povrchu po procesu nitridace č. 2. Hodnoty line scanu jsou uvedeny na tab. 1 a dobře korespondují s obrázky SEM. Obsah niklu se po plazmové nitridaci snížil ze 46 % na 32 %. Obsah dusíku se zvýšil z 0 na 14 %.



a)

b)

c)

Obrázek 14 – EDS line scan nezpracovaného povrchu (a), plazmově nitridovaný povrch po nitridaci 470 °C, 4 hod. (b), plazmově nitridovaný povrch po nitridaci při 550 °C, 20 hod. c).

Zdroj: vlastní

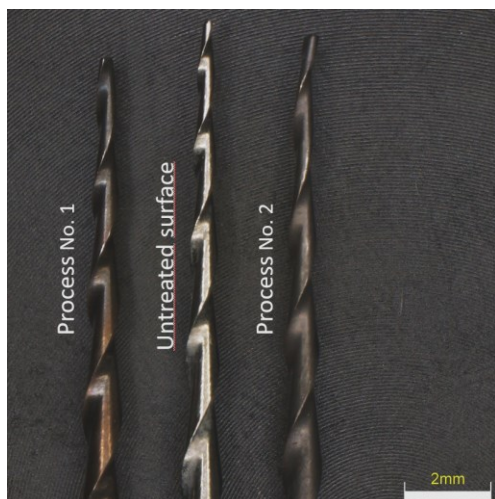
Tabulka 1 – Chemické složení na povrchu nástrojů nezpracovaných a po plazmové nitridaci měřené metodou EDS EDAX (hm. %).

	EDS		
	Ni	Ti	N
Nezpracovaný povrch	46	53	0
Povrch po procesu nitridace č. 1	42	49	9
Povrch po procesu nitridace č. 2	32	54	14

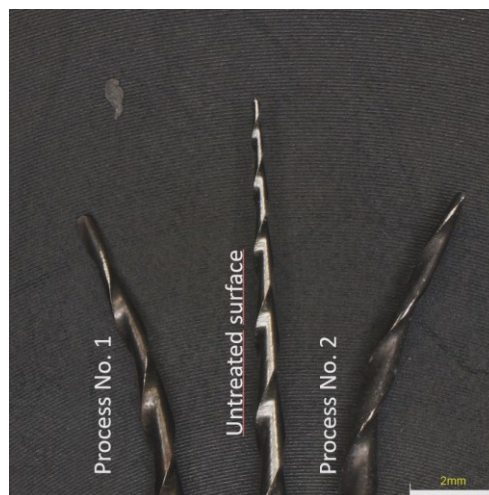
Zdroj: vlastní

U nitridovaných nástrojů je možné dále pozorovat změny v jejich ohebnosti. Po nitridaci se nástroje staly více rigidními. Při experimentu, kdy se špička nástroje ohnula do vzdálenosti 1 cm od osy nástroje, se u nezpracovaných nástrojů vrátila do původní polohy, u nitridovaných nástrojů se špičky nástrojů nevrátily do původních poloh, viz obr. 15.

Při porovnání délek zlomených nástrojů je vidět rozdíl mezi nezpracovanými nástroji a plazmově nitridovanými nástroji, u nitridovaných nástrojů byly delší konce nástrojů.



1. a)

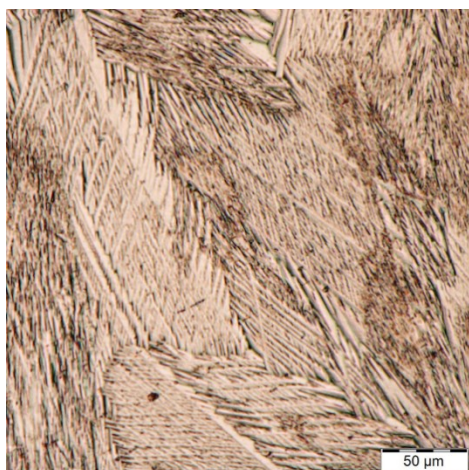


2. b)

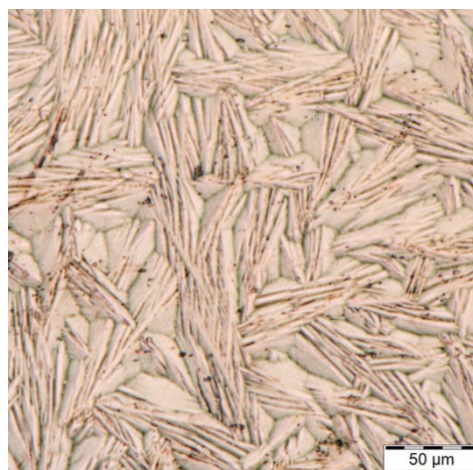
Obrázek 15 – Změny barvy po plazmové nitridaci na koncích nástrojů u nástroje velikosti 20/0,6 (a) ukázka rigidity nástrojů velikosti 15/.05 po procesech plazmové nitridace (b).

Zdroj: vlastní

Obrázky 16a a 16b ukazují rozdíl v mikrostruktuře nástrojů po aplikaci plazmové nitridace. Obrázek 16a ukazuje strukturu jemného martenzitu po procesu 1 a obr. 16b. ukazuje významné zhrubnutí martenzitických jehlic po procesu 2.



a)



b)

Obrázek 16 – Odlišné mikrostruktury nástrojů po plazmové nitridaci 470 °C po dobu 4 hod (a) and plazmové nitridaci 550 °C po dobu 20 hod. (b)

Zdroj: vlastní

Měření mikrotvrlosti

Vzdálenost mezi jednotlivými vtisky byla nastavena tak, aby se na každé vybroušené ploše daly umístit min 4 vtisky. Tímto způsobem byl měřen celý nástroj od hrotu nástroje až po ukončení. Na každém nástroji bylo provedeno v průměru 20 měření na jednotlivých segmentech zalisovaného nástroje.

Měření bylo provedeno na těchto typech vzorků:

nástroje Mtwo 10/.04, 15/.05, 20/.06,
plazmově nitridované vzorky PN 1 470°C 4 hod a PN 2 550 °C 20 hod.

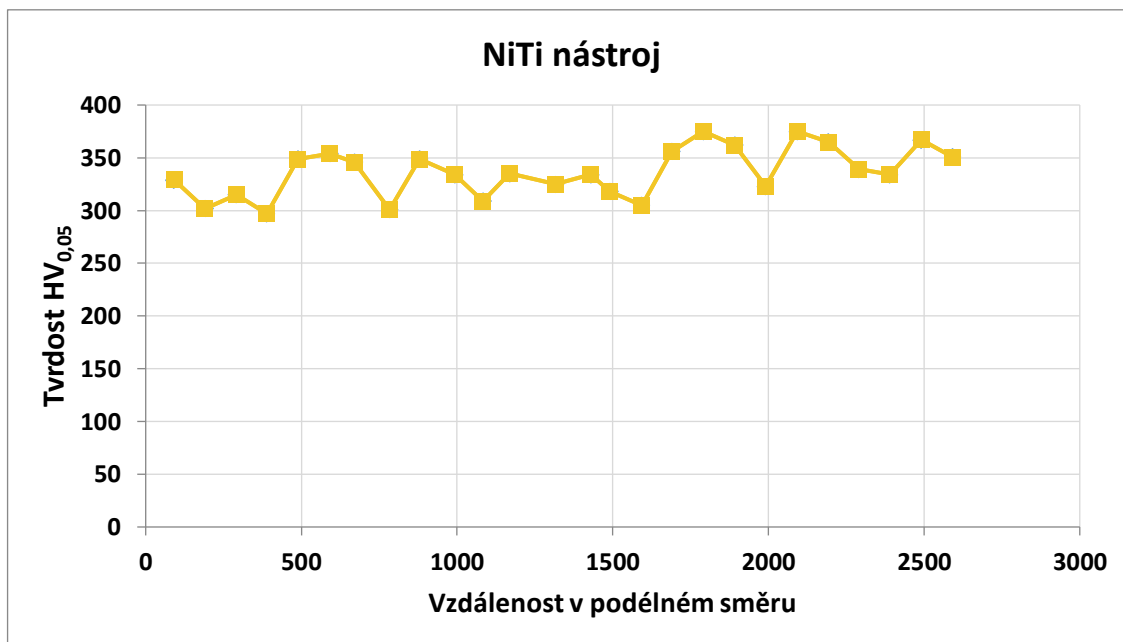
Cílem experimentu bylo zjistit, zda má na mikrotvrdoti NiTi nástroje vliv velikost nástroje a chemicko-tepelné zpracování. Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce. Níže uvedené výsledky jsou průměrem naměřených hodnot z 20 měření. Z výsledků měření je patrné, že na hodnoty mikrotvrdoti nemá vliv ani velikost nástroje ani jeden způsob chemicko-tepelného zpracování, všechny naměřené hodnoty byly v rozmezí chyby měření.

Tabulka 2: Výsledky mikrotvrdoti NiTi nástrojů

	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Nezpracované nástroje	344	18
PN 1	340	19
PN 2	350	23

Zdroj: Vlastní

Při hodnocení mikrotvrdoti v podélném směru se ukázaly určité anomálie a pravidelnosti v naměřených hodnotách. Na obr. 17 je vidět, jak se periodicky zvyšuje hodnota mikrotvrdoti. Tyto změny mikrotvrdoti jsou způsobeny nejspíše způsobem výroby nástroje, kdy dochází k mechanickému zpevnění materiálu při výrobě.



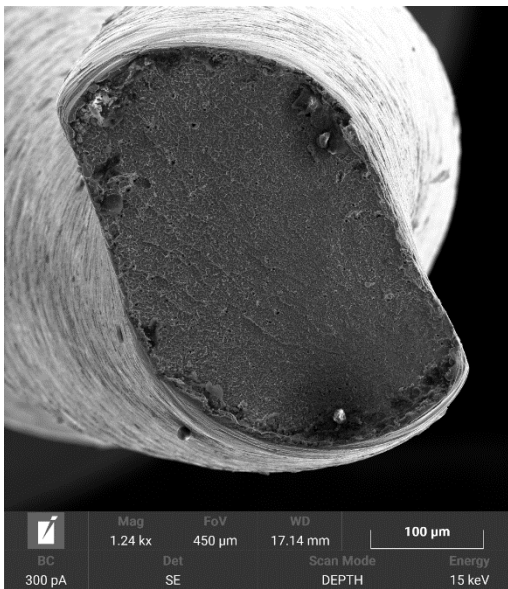
Obrázek 17 – Průběh mikrotvrdości v podélném směru.

Zdroj: vlastní

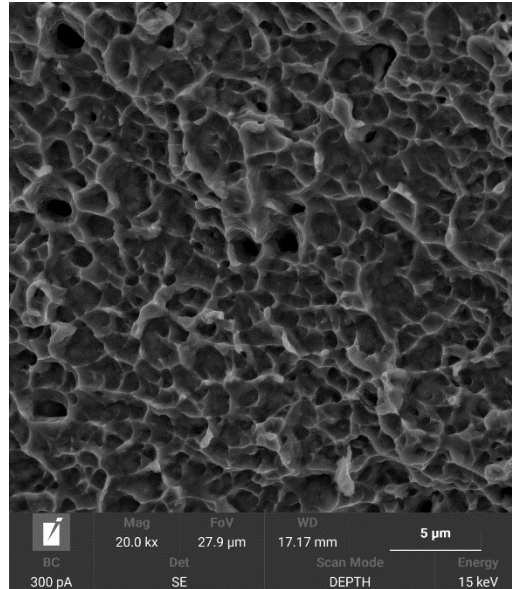
Výsledky tohoto experimentálního měření ukázaly, že hodnoty mikrotvrdości se nemění ani s měnícím se rozměrem NiTi nástroje, a není ani znatelný vliv chemicko-tepelného zpracování. Všechny naměřené hodnoty se pohybovaly ve stejném rozmezí. Naměřené hodnoty byly v dobré shodě s hodnotami uvedenými v literatuře. [Brockhurst and Hsu, 1998], [Ye and Gao, 2012], [Gao et al., 2012], [Pelletier et al., 2002]

Největší vliv má u nástroje Mtwo způsob jeho výroby, kdy při mechanickém stáčení NiTi pásku dochází k lokálnímu mechanickému zpevnování.

Analýza lomových ploch nástrojů byla provedena na elektronovém mikroskopu Tescan Mira 3. Na obr. 18 až 21 jsou vidět lomové plochy nástroje velikosti 15/0.6. Na obrázcích je vidět, že nástroje mají různé lomové plochy. U procesu 2 došlo ke zhrubnutí martenzitu, které můžeme pozorovat na mikrostruktuře na obr 16 b., a detaily lomové plochy jsou v dobré shodě, kdy na obr. 19 a obr. 21 vidíme rozdíl ve velikosti reliéfu jamek. Typ lomu u nástroje po procesu 1 viz obr 18 je smíšený s říčkovitým reliéfem. Na obr. 20 u nástroje po procesu 2 vidíme že lom je také smíšený, ale s vyšším podílem tvárného lomu u tohoto lomu není patrný říčkovitý reliéf.



Obrázek 18 – Nástroj 15/0.5 po plazmové nitridaci – proces 1
Zdroj: vlastní

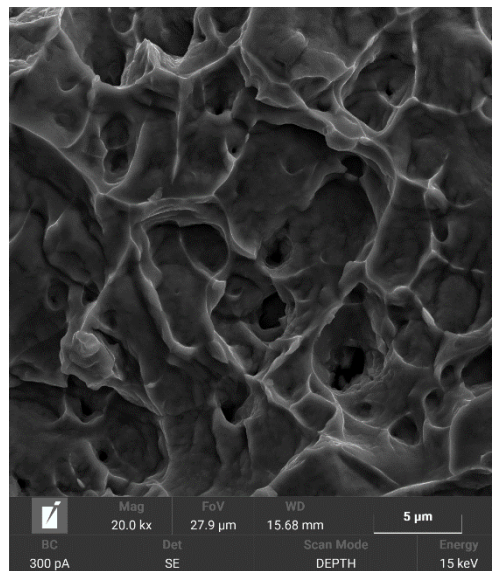


Obrázek 19 – Detailní pohled na lomovou plochu
Zdroj: vlastní



Obrázek 20 – Nástroj 15/0.5 po plazmové nitridaci – proces 2

Zdroj: vlastní



Obrázek 21 – Detailní pohled na lomovou plochu

Zdroj: vlastní

Dílčí závěr

Výsledky experimentu potvrdily úvodní teorii, že i proces nízkoteplotní plazmové nitridace je schopen na nikl titanových nástrojích vytvořit vrstvu nitridů. Při porovnání zvolených nitridačních procesů se jako vhodnější ukázal proces č. 2, který probíhal za teploty 550 °C, 20 hod. U obou procesů došlo po aplikaci plazmové nitridace k částečné ztrátě elasticity nástroje, která ovšem z klinického hlediska nepředstavuje problém, protože během ošetřování zahnutého kanálku se nástroje lépe přizpůsobí tvaru kanálku a při rotaci v ohybu odebírá méně dentinu. Při pozorování mikrostruktury při nitridačním procesu 2 došlo k výraznému zhrubnutí martenzitických jehlic, zatímco po nitridačním procesu 1 zůstala mikrostruktura stejná.

Při zkouškách cyklické únavové životnosti se ukázalo, že proces plazmové nitridace je schopen zvýšit cyklickou únavovou životnost nástrojů. U procesu 1 se ukázalo, že nízká teplota nitridace nemá výrazný vliv na cyklickou únavovou životnost nástrojů větších průměrů, u nejtenčího nástroje bylo naměřeno zvýšení počtu otáček do lomu.

U procesu 2 došlo k výrazně lepším výsledkům. Při vyšších teplotách došlo k změně mikrostruktury nástroje, kdy martenzitické jehlice byly oproti původní teplotě výrazně hrubší. Nástroje po tomto procesu částečně ztratily elasticitu.

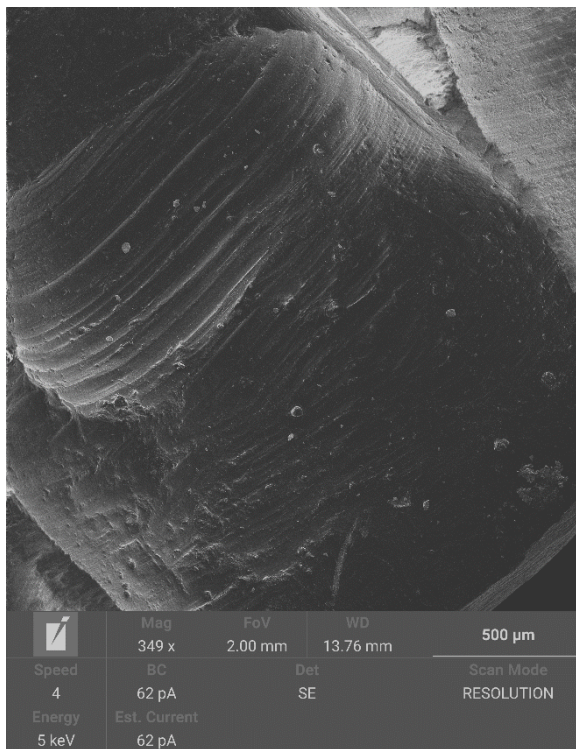
Výsledky únavové životnosti u procesu 2 ukázaly, že u procesu 2 došlo k výraznému zvýšení únavové životnosti po aplikaci plazmové nitridace. U nástrojů velikosti 10/0,4 došlo až k dvojnásobnému prodloužení životnosti již použitého nástroje.

4 SEM analýza hodnocení povrchu kanálků

Hodnocení povrchu kořenových kanálků bylo provedeno na extrahovaných zubech. Pro pozorování byly zvoleny dvě metody metoda SEM a konfokální mikroskopie. V rámci experimentu byl 1 kořenový kanálek zubu ošetřen ruční metodou za použití ručního nástroje Kerr reamer ISO 15/02, 20/02, 25/02, kanálek byl postupně opracován pomocí cirkulárně-obvodové metody, kdy při změně nástroje byl kořenový kanálek vždy důkladně vypláchnut pomocí 5% NaOCl. Druhý kořenový kanálek byl ošetřen pomocí nástroje Mtwo na strojovou endodoncii, kanálek byl postupně opracován nástroji ISO 15/05, 20/06, 25/06, při změně nástroje byl kanálek důkladně vypláchnut pomocí 5% NaOCl.

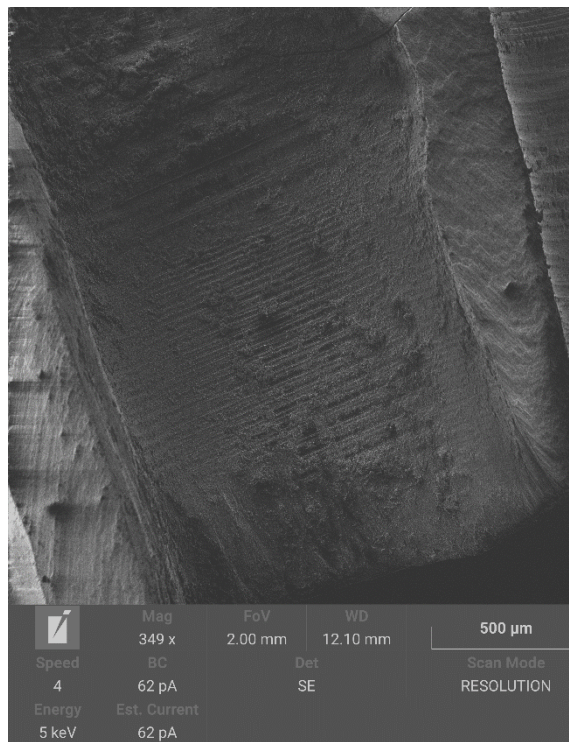
Po ošetření kanálku byly zuby podélně na dvou stranách částečně naříznuty brusným kotoučem a následně rozlomeny, tak abychom mohli vyhodnotit povrch zubního kanálku.

Na rozlomených kusech zubu byly poté metodou SEM pozorován povrch kanálků. Povrchy kanálků jsou na obr. 22, 23, 24, 25.



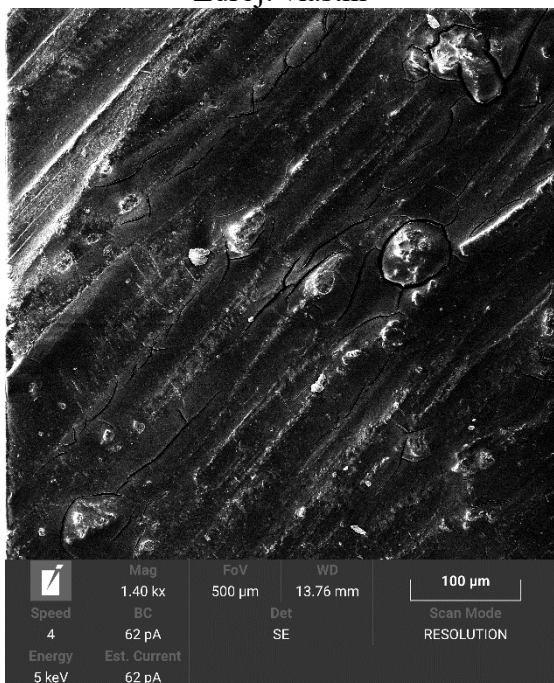
Obrázek 22 - Povrch ručně opracovaného kanálku

Zdroj: vlastní



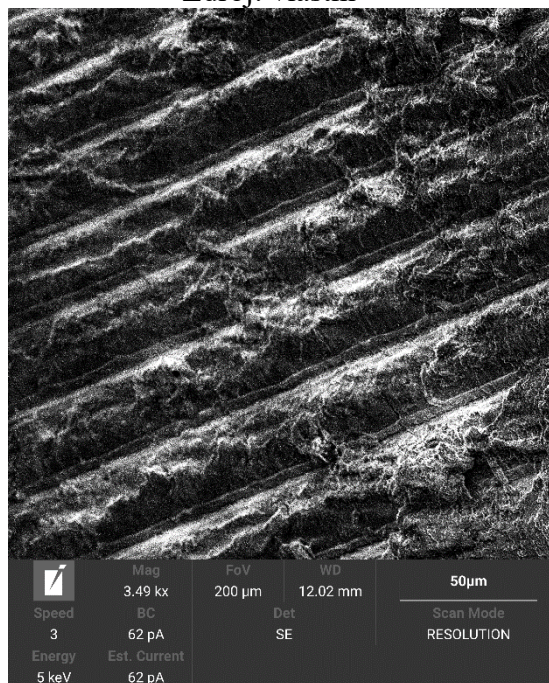
Obrázek 23 - Povrch strojově opracovaného kanálku

Zdroj: vlastní



Obrázek 24 - Stopy na povrchu ručně opracovaného kanálku

Zdroj: vlastní



Obrázek 25 - Stopy na povrchu strojově opracovaného kanálku

Zdroj: vlastní

Na obrázcích, kde jsou zobrazeny povrchy po ručním opracování kanálků, můžeme pozorovat, že povrch kanálku je zvlněný, stopy po nástroji nejsou stejnoměrné.

Na obrázcích, kde jsou zobrazeny povrchy kanálku po strojovém opracování můžeme pozorovat, že povrch kanálku není zvlněný, je přímý a stopy po nástroji jsou rovnoměrné.

Z pohledu klinické praxe je mnohem lepší kvalita povrchu kořenového kanálku po strojovém opracování. Toto opracování dosahuje vyšší kvality, menšího poškození dentinu a lepší čistoty povrchu. Zároveň takto opracovaný kořenový kanálek umožňuje lepší dezinfekci pomocí výplachových roztoků a následně zatékání kořenové výplně, které následuje po opracování, takto se sníží riziko neošetřených a nevyplněných dutin v systému kořenových kanálků zubu. Opracování co největší plochy kořenového systému zubních kanálků je důležitým předpokladem pro úspěšné ošetření zubu. Jen dobře opracovaný kořenový kanálek, kdy odstraníme infikovaný dentin a bakterie, může být následně dobře hermeticky uzavřen a zub tak mít dobrou prognózu.

5 Závěr

Aristoteles měl pravdu – dokonalost je zvyk, a ne charakterový rys. Ve stomatologii je dokonalost očekávána. Technologický progres dosažený za poslední léta umožnil velký pokrok v endodontické terapii. Uvedení slitin niklu a titanu a zavedení strojové endodontie představuje významný posun vpřed, čímž se prolomilo téměř 200leté paradigma čistě manuální instrumentace. Nicméně, způsob instrumentace kořenového kanálku zůstává v neustále se měnícím stavu, ať už kvůli vývoji nových nástrojů s různými návrhy nebo dalším pokrokům v úpravách NiTi slitin, s neustálou snahou získat odolnější a flexibilnější systémy.

Odolnost vůči cyklické únavě rotačních NiTi nástrojů byla předmětem velkého zájmu v endodontické literatuře. Dopad torzní zlomeniny, únavy kovu nebo zlomeniny rotačních NiTi nástrojů způsobené kombinací torzního napětí a akumulace únavy se stále diskutuje. Únava materiálu se zdá být důležitým důvodem pro selhání rotačních nástrojů během klinického použití.

Současná literatura odráží trend směrem k použití NiTi slitin s tepelným zpracováním a řízenou pamětí, navrženými pro zvýšení flexibility a snížení vlastností tvarové paměti nástrojů. V klinické praxi lze tyto nástroje předem ohnout a zachovat tento ohnutý tvar, usnadňující průnik ke vstupu do kořenového kanálku. CM nástroje mají také vyšší schopnost deformace před zlomeninou než konvenční nástroje, kvůli jejich větší flexibilitě a odolnosti proti cyklické únavě.

V experimentální části práce byl hodnocen vliv různých parametrů na únavovou životnost endodontických nástrojů. Byl zkoumán vliv tvaru nástroje, zahnutí kanálku, vliv plazmové nitridace a sterilizace, tedy vlivů, se kterými se běžně setkáváme v klinické praxi. Výsledky ukázaly, že každý z těchto parametrů částečně přispívá k snižování životnosti nástroje během používání, ale je třeba ještě dalších komplexních experimentů na procentuální zhodnocení vlivu samostatných parametrů.

Zároveň bylo experimentem, kdy se aplikoval proces plazmové nitridace na nástroje ověřeno, že lze i zvýšit únavovou životnost. Tento proces nabízí možnosti dalšího rozvoje, ovšem tento rozvoj je třeba podpořit řadou dalších experimentů s nastavením procesu nitridace tak, aby životnost nástrojů byla zvýšena u všech typů a rozměrů nástrojů rovnoměrně.

Z výsledků experimentů je možné vyvodit doporučení pro praxi, že není možné použití jediného systému či nástroje, který by byl univerzální a hodil by se pro opracování všech typů kořenových kanálků. Nástroje s vyšší tuhostí (čtvercový průřez, trojúhelníkový průřez) je vhodné používat na opracování přímých nebo málo zahnutých kořenových kanálků. Pro velmi zahnuté kořenové kanálky je vhodné používat nástroje s nižší tuhostí (S tvar).

Jak již bylo zmíněno, dalším faktorem selhání rotačních NiTi nástrojů je zkušenost operátora. Je pravděpodobné, že další iatrogenní chyby spojené s preparací kanálků jsou rovněž úzce spojeny se zkušenostmi lékaře. Přestože novější rotační NiTi nástroje mohou snížit pravděpodobnost nehod, pochopení jejich omezení a jejich správné použití je nanejvýš důležité. Silně zakřivené a úzké kořenové kanálky však představují výzvu i pro velmi zkušeného operátora.

U všech rotačních NiTi nástrojů je třeba dodržovat základní principy a doporučení pro strojovou instrumentaci, tak aby se omezilo riziko cyklického únavového selhání, torzní zlomeniny nebo jejich kombinaci. Jak již bylo zmíněno, taktéž faktor vlivu operátora je velmi významný.

K dnešnímu dni stále neexistuje endodontický nástroj schopný splnit všechny požadavky optimální přípravy kořenového kanálku. Nové materiály a studie musí být vyvinuty v pokračování hledání systému, který dokáže kombinovat účinnost a bezpečnost v endodontické instrumentaci.

Výsledky uvedené v této disertační práci byly publikovány v impaktovaných časopisech, kde byly podrobeny recenznímu řízení.

6 Seznam použité literatury

Brockhurst, P., Hsu, E., 1998. Hardness And Strength Of Endodontic Instruments Made From NiTi Alloy. *Australian Endodontic Journal* 24, s. 115–119, Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1747-4477.1998.tb00034.x>.

Gao, Y., Gutmann, J.L., Wilkinson, K., Maxwell, R., Ammon, D., 2012. Evaluation of the Impact of Raw Materials on the Fatigue and Mechanical Properties of ProFile Vortex Rotary Instruments. *Journal of Endodontics* 38, s. 398–401, Dostupné z: [https://www.jendodon.com/article/S0099-2399\(11\)01345-8/abstract](https://www.jendodon.com/article/S0099-2399(11)01345-8/abstract).

Herzberg, M., 1979. Bacterial endocarditis of dental origin. *Northwest dentistry* 58, s. 270–2.

Iqbal, A., 2021. Rotary Endodontics : A Paradigm Shift from Conventional Endodontics. *Aljouf University Medical Journal* 300, s. 1–10, Dostupné z: <https://platform.almanhal.com/Details/Article/240472?lang=en>.

Parahitiyawa, N.B., Jin, L.J., Leung, W.K., Yam, W.C., Samaranayake, L.P., 2009. Microbiology of odontogenic bacteremia: beyond endocarditis. *Clin Microbiol Rev* 22, s. 46–64, Table of Contents.

Pelletier, H., Muller, D., Mille, P., Grob, J.J., 2002. Effect of high energy argon implantation into NiTi shape memory alloy. *Surface and Coatings Technology* 158–159, s. 301–308, Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897202001871>.

Peřinka, L., Bartůřková, ř., Záhlová, E., Dentissimo (firma), 2009. *Základy klinické endodoncie*. Art D - Grafický ateliér Āerný, Praha, ISBN: 978-80-903876-8-3.

Plotino, G., Grande, N.M., Cordaro, M., Testarelli, L., Gambarini, G., 2009. A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 35, s. 1469–1476.

Ye, J., Gao, Y., 2012. Metallurgical Characterization of M-Wire Nickel-Titanium Shape Memory Alloy Used for Endodontic Rotary Instruments during Low-cycle Fatigue. *Journal of Endodontics* 38, s. 105–107, Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0099239911011538>.

7 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Výrobní výkres kanálku s poloměrem zaoblení R5.....	9
Obrázek 2 - Výrobní výkres kanálku s poloměrem zaoblení R3.....	10
Obrázek 3 - Vyrobené testovací bločky pro hodnocení cyklické únavy	11
Obrázek 4 - Vliv otáček na životnost nástroje.....	12
Obrázek 5 - Počet otáček do lomu nástroje umělý kanálek R5	13
Obrázek 6 - Počet otáček do lomu nástroje umělý kanálek R3	14
Obrázek 7 - Lomové plochy nástroje Wizard Navigator.....	15
Obrázek 8 - Lomové plochy nástroje Revo S.....	15
Obrázek 9 - Počet otáček do lomu – vliv způsobu otáčení.....	16
Obrázek 10 - Počet otáček do lomu – vliv sterilizace	16
Obrázek 11 - Porovnání únavové životnosti po plazmové nitridaci.....	17
Obrázek 12 - Nitridovaná vrstva na NiTi nástroji velikosti 20/.06 po plazmové nitridaci 470 °C, 4 hodiny.....	18
Obrázek 13 - Nitridovaná vrstva na NiTi nástroji velikosti 20/.06 po plazmové nitridaci 550 °C, 20 hodin.....	18
Obrázek 14 - EDS line scan nezpracovaného povrchu (a), plazmově nitridovaný povrch. 19	
Obrázek 15 - Změny barvy po plazmové nitridaci na koncích nástrojů u nástroje velikosti 20/0,6 (a) ukázka rigidity nástrojů velikosti 15/.05 po procesech plazmové nitridace (b)..	20
Obrázek 16 - Odlišné mikrostruktury nástrojů po plazmové nitridaci 470 °C for 4 hod (a) and plazmové nitridaci 550 °C for 20 hod. (b).....	20
Obrázek 17 - Průběh mikrotvrdomosti v podélném směru.....	22
Obrázek 18 - Nástroj 15/0.5 po plazmové nitridaci – proces 1	23
Obrázek 19 - Detailní pohled na lomovou plochu.....	23
Obrázek 20 - Nástroj 15/0.5 po plazmové nitridaci – proces 2	23
Obrázek 21 - Detailní pohled na lomovou plochu.....	23
Obrázek 22 - Povrch ručně opracovaného kanálku	26
Obrázek 23 - Povrch strojově opracovaného kanálku	26
Obrázek 24 - Stopy na povrchu ručně opracovaného kanálku	26
Obrázek 25 - Stopy na povrchu strojově opracovaného kanálku	26

8 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chemické složení na povrchu nástrojů nezpracovaných a po plazmové nitridaci měřené metodou EDS EDAX (hm. %).	19
Tabulka 2: Výsledky mikrotvrdomosti NiTi nástrojů	21

Seznam publikací doktoranda

1. publikace in extenso, které jsou podkladem disertace

a) s impact factorem

Bumbalek, M., Joska, Z., Pokorný, Z., Sedlak, J., Majerik, J., Neumann, V., Klima, K., 2021. Cyclic Fatigue of Dental NiTi Instruments after Plasma Nitriding. *Materials (Basel)* 14, 2155. <https://doi.org/10.3390/ma14092155>. IF=3,623

BENDOŮVÁ, Veronika, Michal BUMBALEK a Stanislav KATINA. Cox proportional hazard model and its application to data analysis of failure of endodontic equipment. *BIOMEDICAL PAPERS-OLOMOUC*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2017, Neuveden, č. 161, s. "S1"- "S11", 11 s. ISSN 1213-8118. IF=1,245

Fišerová, E., Chvosteková, M., Bělašková, S., Bumbálek, M., Joska, Z., 2015. Survival Analysis of Factors Influencing Cyclic Fatigue of Nickel-Titanium Endodontic Instruments. *Advances in Materials Science and Engineering* 2015, e189703. <https://doi.org/10.1155/2015/189703>. IF=1,726

b) bez IF: ---

2. publikace in extenso bez vztahu k tématu disertace

a) s impact factorem

Tran, Q.D., Manas, K., Svoboda, E., Bumbálek, M., Joska, Z., 2012. Impact of bleaching gels on dental enamel microhardness and 3D surface roughness. *Chemicke Listy* 106, s549–s550. IF=0,381

b) bez IF: ---