



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

OPTIMALIZACE OBRÁBĚNÍ KERAMICKÝCH POLOTOVARŮ

MILLING OPTIMIZATION OF CERAMIC BLANKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jana Ráčková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Martin Trunec, Dr.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Studentka: **Bc. Jana Ráčková**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Martin Trunec, Dr.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Optimalizace obrábění keramických polotovarů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

CNC frézování keramických polotovarů se stává důležitou a často využívanou metodou tvarování keramických dílů, a to především při výrobě prototypů nebo malých sérií keramických výrobků se složitými tvary. Ve spojení s přípravou keramických polotovarů metodou gelového lití nabízí CNC obrábění rozšířené možnosti ve výrobě vysoce kvalitních, přesných a velkých keramických výrobků. Využití nalezne tento postup v přípravě keramických dílů pro řadu aplikací, mezi jinými i pro personalizovanou medicínu jako individualizované keramické náhrady. Podmínky frézování však musí být optimalizovány pro každý materiál a způsob přípravy keramického polotovaru.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je optimalizovat obráběcí parametry keramických polotovarů na bázi oxidu hlinitého a zirkoničitého připravených metodou gelového lití.

Seznam doporučené literatury:

RAHAMAN, M. N. Ceramic Processing. Boca Rayton: CRC Press, 2007. ISBN 9781315276045.

BERA, O., TRUNEC, M. Optimization of fine alumina gelcasting using in situ dynamic rheology. 2012, 95(9), 2849-2856. ISSN 1551-2916.

FILSER, F., KOCHER, P., GAUCKLER, L. J. Net-shaping of ceramic components by direct ceramic machining. Assembly Automation. 2003, 23(4), 382-390. ISSN 0144-5154.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 25. 8. 2017



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá hlavně optimalizací obrábění keramických polotovarů ze ZrO_2 a Al_2O_3 . První část práce je věnovaná literární rešerši, ve které jsou popsány jednotlivé kroky technologie tvarování keramických polotovarů, především metoda gelcasting. Práce popisuje možnosti frézování keramických materiálů, pomocí CNC technologie. Práce popisuje závislost získaných drsností na úpravách polotovarů a použitých strategiích obrábění. Nejnižších parametrů drsnosti na vzorcích ZrO_2 bylo dosaženo po jejich vyžihání na $900\text{ }^\circ\text{C}$, zatím co u vzorků Al_2O_3 bylo nejnižších drsností dosaženo na vzorcích v nevyžihávaném stavu. Vzorky obrobene kulovou frézou vykazovaly drsnosti povrchu $Ra = 1\text{ }\mu\text{m}$ pro ZrO_2 a $Ra = 1,3\text{ }\mu\text{m}$ pro Al_2O_3 . Rovněž popisuje možnost obrábění tvarů s ostrými hranami a jemnými detaily, u kterých bylo nejlepších výsledků dosaženo na vzorcích ZrO_2 vyžihávaných na 900 a $1100\text{ }^\circ\text{C}$. Opotřebenění nástroje bylo významné především při obrábění vzorků Al_2O_3 vyžihávaných na teploty vyšší než $800\text{ }^\circ\text{C}$.

Klíčová slova

Al_2O_3 , ZrO_2 , frézování, obrábění, drsnost povrchu, CNC, gelcasting, CAD/CAM

ABSTRACT

The master thesis deals mainly with the optimization of machining of ceramic semi-finished products from ZrO_2 and Al_2O_3 . The first part with literary research, which describes the steps of the technology of forming ceramic bodies, especially the gelcasting method. The thesis describes possibilities of milling of ceramic materials using CNC technology. The thesis describes the dependence of acquired roughness on bodies and used machining strategies. The best roughness parameters on ZrO_2 samples were obtained after they were calcined at $900\text{ }^\circ\text{C}$, while the lowest roughness was obtained on the samples in the unprotected state for the Al_2O_3 samples. Samples machined with a spherical milling cutter showed surface roughness $Ra = 1\text{ }\mu\text{m}$ for ZrO_2 and $Ra = 1.3\text{ }\mu\text{m}$ for Al_2O_3 . It also describes the possibility of machining sharp-edged shapes and fine details where the best results are achieved on ZrO_2 samples engraved at 900 and $1100\text{ }^\circ\text{C}$. Tool wear was particularly important when machining samples of Al_2O_3 ignited at temperatures above $800\text{ }^\circ\text{C}$.

Key words

Al_2O_3 , ZrO_2 , milling, machining, surface roughness, CNC, gelcasting, CAD/CAM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RÁČKOVÁ, J. *Optimalizace obrábění keramických polotovarů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 75 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Martin Trunec, Dr..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace obrábění keramických polotovarů** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....

Datum

.....

Jana Ráčková

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Martinu Truncovi, Dr. za cenné rady a připomínky. Dále bych chtěla poděkovat paní Ing. Zdence Skálové za pomoc v laboratořích a vstřícnost, panu Ing. Jaroslavu Kaštylovi, Ph.D. za pomoc při obrábění polotovarů a práci s frézkou a panu Ing. Přemyslu Šťastnému za pomoc při zpracování obrazové dokumentace práce. Rovněž děkuji laboratořím CEITEC nano za možnost využití přístrojové techniky. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům za podporu a trpělivost, kterou mi poskytli během studia, a které si velice vážím.

OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Teoretická část	2
2.1	Tvarování keramických polotovarů pro obrábění	2
2.1.1	Příprava polotovarů metodou gelcasting	4
2.2	Obrábění keramických materiálů	9
2.2.1	Obrábění keramiky ve slinutém stavu.....	10
2.2.2	Obrábění keramiky v neslinutém a vyžíhaném stavu	11
2.3	Příprava keramik tvarováním bez forem a jeho srovnání s frézováním.....	17
3	Cíle práce	19
4	Experimentální část.....	20
4.1	Příprava polotovarů pro obrábění.....	20
4.1.1	Použité materiály	20
4.1.2	Příprava suspenzí a zkušebních těles	20
4.2	Obrábění	22
4.2.1	Obrábění ploch pro hodnocení drsnosti	23
4.2.2	Obrábění tvarů pro hodnocení hran a špic	24
4.2.3	Obrábění složitých tvarů a jejich tvarová stabilita.....	25
4.3	Metody hodnocení.....	26
4.3.1	Nasákavost těles.....	26
4.3.2	Kvalita obrobených povrchů keramických součástí	27
4.3.3	Mikroskopická analýza	28
4.3.4	Hodnocení hran a špic.....	28
5	Výsledky a diskuse	31
5.1	Vlastnosti polotovarů	31
5.2	Kvalita obrobených povrchů	33
5.2.1	Plochy	33
5.2.2	Boční stěny.....	39
5.3	Hrany a špice.....	40
5.4	Složitě tvary.....	41
5.5	Opotřebení nástroje	42
6	Závěr	44
7	Literatura.....	45

1 Úvod

Spolu s rozvojem nových technologií a materiálového inženýrství mají keramické materiály stále důležitější postavení v mnoha oblastech použití. Jsou používány například v oblasti elektroniky, komunikace, letectví, kosmonautice, životního prostředí, medicíny aj., kde se doposud nebyly schopny prosadit. Vyspělé keramické materiály umožňují i aplikace, které byly doposud pokládány za nemožné. Díky svým jedinečným vlastnostem je technická (inženýrská) keramika, považována za jeden z nejslibnějších materiálů naší doby. Ve druhé polovině 20. století bylo vyrobeno mnoho druhů těchto materiálů s kontrolovaným chemickým složením, díky čemuž se získaná keramika vyznačuje zcela specifickými vlastnostmi, ať už jsou to vlastnosti teplotní, mechanické, elektromagnetické, optické nebo biokompatibilní.

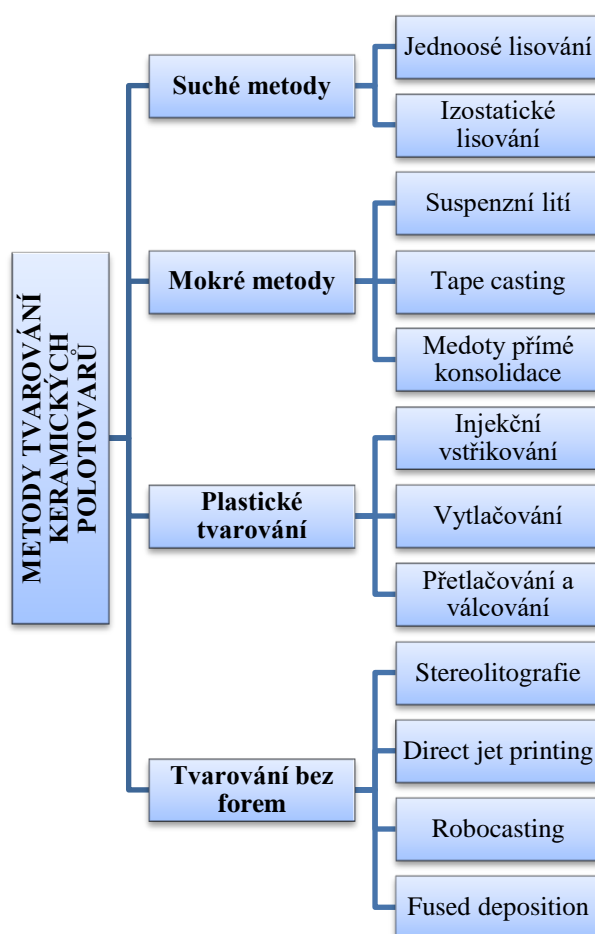
Díky rozsáhlým možnostem použití vyspělých keramických materiálů vyvstává otázka jejich tvarování. Nabízí se celá řada možností od metody jednoduchého lisování až po metody sofistikovanější, jako je například metoda gel-casting. Pomocí této metody lze připravit keramické polotovary se složitějšími tvary ve srovnání s dalšími metodami. Ne vždy je ale získaná přesnost dostatečná a je nutný další krok k jejímu zvýšení. Jednou z možností, která se nabízí, je obrábění. Vzhledem k vlastnostem keramických materiálů, jako je vysoká tvrdost a křehkost, je ovšem tato technologie poměrně komplikovaná. V současnosti se jako nejslibnější jeví frézování v neslinutém či vyžíhaném stavu spolu s použitím CNC technologií (počítačem řízené obrábění). Výhoda spočívá v možnosti nahrání programu vytvořeného pomocí CAD/CAM softwaru, s jehož pomocí lze naprogramovat rozměrově přesný model, a pomocí CNC technologie jej obrobit. Výhodou, kterou skýtá tato technologie je reprodukovatelnost a možnost drobných úprav programu.

Tato práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a experimentální. Teoretická část zahrnuje výčet možností tvarování keramických polotovarů a podrobnější popis metody gel-casting. Rovněž se zaměřuje na možnosti obrábění keramických polotovarů a to především z materiálů ZrO_2 a Al_2O_3 . Experimentální část obsahuje popis strategií a jejich vliv na drsnost. Dosažené výsledky jsou diskutovány v kapitole 5 a následně shrnuty v závěru této práce.

2 Teoretická část

2.1 Tvarování keramických polotovarů pro obrábění

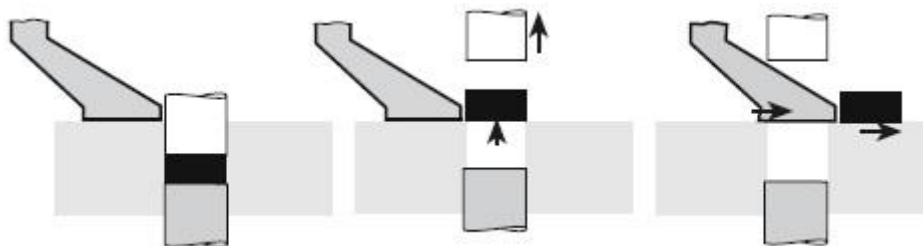
Metody tvarování polykrystalické keramiky lze rozdělit do 4 základních skupin, viz obr. 1. Příprava keramických polotovarů pro obrábění lze provádět několika různými technikami. Obecně se pro přípravu polotovarů pro obrábění využívají suché a mokré metody (obr. 1). Výběr metody tvarování závisí na velikosti, rozměrových tolerancích produktu, požadované mikrostruktuře, potřebné úrovni reprodukovatelnosti a ekonomickém hledisku [1].



Obr. 1 Graf rozdělení metod tvarování keramických polotovarů

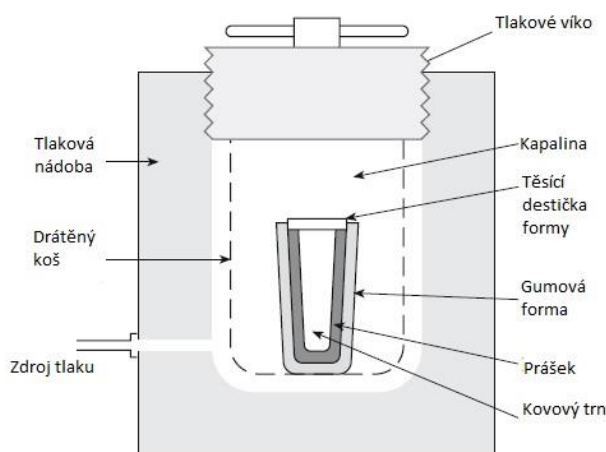
Suché metody

Představitelem suchých metod je *lisování*, kde se keramický prášek s aditivou tvaruje do požadovaného tvaru pomocí jednoosého lisu. U jednoosého lisování může být daný tlak vyvinutý pístem až 300 MPa v závislosti na materiálu a typu lisu. Proces lisování se skládá ze tří kroků: vyplnění dutiny lisu práškem, zhuštění obsahu a vysunutí hotového výlisku (obr. 2). Jednoosé lisování je jednou z nejjednodušších a nejrozšířenějších metod pro vysokoobjemové tvarování keramiky. Možné nedostatky u metody jednoosého lisování jsou praskání polotovarů, otěr forem a nerovnoměrné zhuštění prášku [1].



Obr. 2 Znárodnění postupu při jednoosém lisování [1]

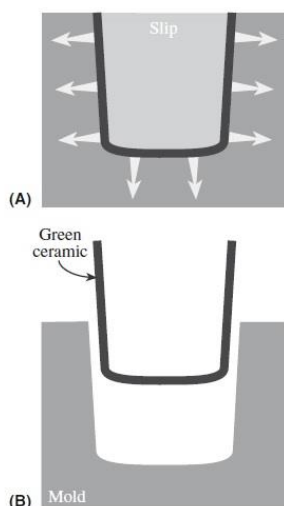
Při *izostatickém lisování za studena* („CIP“) je tlak vyvíjen za pomoci kapalného média ve všech směrech. Prášek je navážen do gumového vaku, který je následně utěsněn. Připravený vak je vložen do vysokotlaké komory naplněné tekutinou (olej nebo voda), a je hydrostaticky lisován (obr. 3). Tlak se obvykle pohybuje od 20 MPa až do 1 GPa v závislosti na aplikaci. Běžně se keramický prášek lisuje při tlacích v rozmezích 200 - 300 MPa. Mezi výhody této metody patří využití pro různé tvary a velikosti vylisků, rovnoměrné zhuštění vylisku a především nízká nákladovost. Mezi nevýhody patří naopak dlouhé výrobní cykly a špatná rozměrová přesnost a kontrola. Metoda je používána pro přípravu objemnějších a tvarově nenáročných keramických těles [1].



Obr. 3 Schématické znázornění izostatického lisování [1]

Mokrė metody

Mezi mokré metody se řadí například *lití*. Lze použít i označení suspenzní lití. Tvorba tělesa probíhá pomocí odvodňování suspenzí přes polopropustnou stěnu (sádra, porézní polymer). *Suspenzní lití*, anglicky „slip casting“, je nejčastější metodou mokrého tvarování. Princip metody spočívá v zalití porézní formy keramickou suspenzí. Pomocí kapilárních tlaků je kapalina ze suspenze absorbována pórovitou formou, a tím se tvoří keramická „skořepina“ obr. 4). Tento proces probíhá do doby, kdy skořepina dosáhne požadované tloušťky. Následně je přebytečná suspenze z formy vylita. Suspenzní lití má více variant jako například odstředivé nebo tlakové lití. Při odstředivém lití je rychlost odvodu kapaliny zvýšena působením odstředivých sil.



Obr. 4 Znárodnění procesu výroby dílů pomocí metody suspenzního lití a) nalití suspenze a odvod tekutiny do pórů formy, b) vyjmutí odlitku o požadované tloušťce [1]

Další z mokrých metod je *gelové lití*, anglicky „gelcasting“. Tento proces slouží pro vytváření složitějších a tvarově náročných keramických dílů. Díly vyráběné metodou gelového lití vykazují homogenitu v celém objemu. Další metodou je přímé koagulační lití (DCC). Polotovary připravené metodou gelového lití jsou vhodné pro obrábění a tvarové polotovary. Podrobnějšímu popisu metody gelového lití je věnována kapitola 2.1.1.

2.1.1 Příprava polotovarů metodou gelcasting

Proces gelcasting byl vyvinut v divizi Metals and Ceramics - Ceramic Processing Group v Oak Ridge National Laboratory (ORNL) v USA v roce 1993 [2, 3]. Je to atraktivní tvářecí proces určen k výrobě vysoce kvalitních, tvarově složitých keramických dílů. Gelcasting překonává řadu omezení spojených s formovacími metodami, jako je vstřikování nebo odlévání [4]. Principem je disperze keramického či kovového prášku ve vodném roztoku monomeru za vzniku tekuté suspenze, která následně geluje ve formě [3]. Výsledkem je homogenní těleso mokrého odlitku s jednotným složením a hustotou, které obsahuje jen několik procent organického pojiva (většinou 3 – 5 hm. % [5]). Po vysušení dochází k odstranění pojiva a slinování, jako u jiných keramických procesů. Vlastnosti materiálu po slinování jsou konstantní v celém tělese [2].

Vysoká pevnost neslinutého tělesa nabízí značnou výhodu při manipulaci s díly před slinováním a při výrobě velkých výrobků. Na druhé straně je velikost smršťování neslinutého tělesa vyrobeného procesem gelcasting asi 2 %, což vede k snadné deformaci tvaru případně celé součásti. Přesto, že byly gelové odlitky vyvinuty jako způsob tvarování s téměř čistým tvarem, může být obrábění gelových odlitků v neslinutém stavu obzvláště užitečné pro výrobu keramických komponent [5, 6].

Pomocí metody gelcasting lze vyrábět zvláště složité tvary a tělesa, u kterých jsou současně tenké i silné stěny [7], viz obr. 5. Obecně lze výhody gelcastingu shrnout následujícím způsobem: schopnost vyrábět složité díly, nízké investiční náklady, možnost

použití levného materiálu formy, možnost zavedení hromadné výroby, vysoká pevnost neslinitého tělesa, obrobitelnost těles v neslinitém stavu, homogenní vlastnosti těles, snadné odstranění pojiva. Tento proces je obecný a může být použit pro široké spektrum keramických i kovových prášků [2].

Gelcasting má ovšem i své zápory, mezi které patří toxicita některých použitých monomerů a časově náročný a zdoluhavý krok sušení. Přírodní monomery, které se používají v malém množství ve výživě a v medicíně, mohou hrát významnou roli při odstranění problémů s toxicitou [3].



Obr. 5 Součásti vyrobené metodou gelcasting, odlité do gumových forem [8]

Princip výroby těles metodou gelcasting

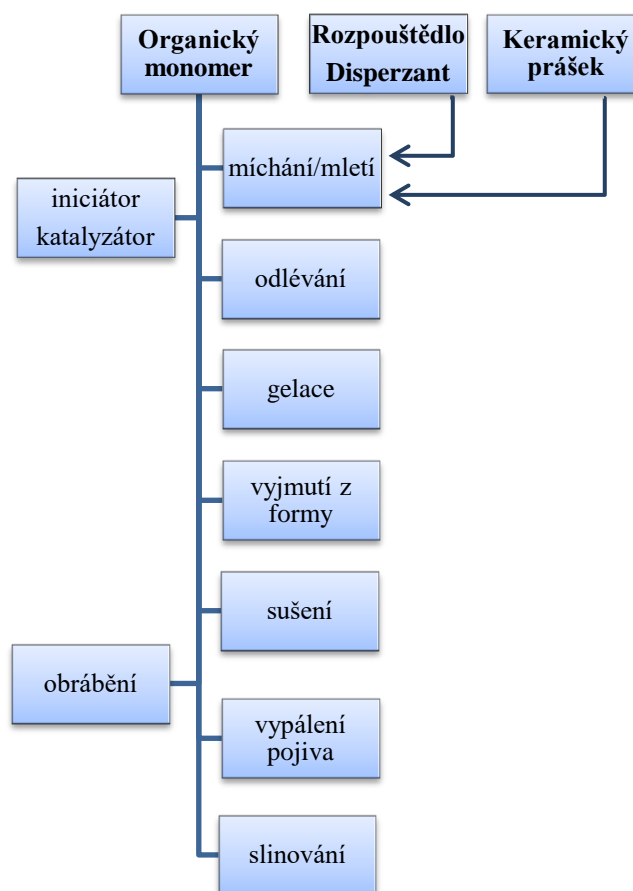
Výrobní postup celého procesu je patrný z obr. 6. Proces je založen na odlévání suspenze obsahující rozdispergovaný keramický prášek např. v deionizované vodě a vodou rozpustných organických monomerech. Po odlití suspenze polymeruje za vzniku gelových těles. Sušení a slinování je stejné jako u ostatních metod [3].

Složení monomerního roztoku

Monomerní premix je roztok organických monomerů, ve kterých je následně dispergován keramický prášek. Zpravidla se skládá z rozpouštědla, které určuje, zda je proces vodný nebo nevodný, a dvou typů organických monomerů. Hlavní monomer má jednu dvojnou vazbu, a pokud je polymerován samotný, tvoří lineární polymer. Druhým monomerem je síťovací monomer, který má alespoň dvě dvojně vazby. Pokud jsou tyto dva monomery polymerovány společně, výsledkem je zesítěný polymer (gel) [9]. Pro gelcasting mohou být použity jak nevodná, tak vodná rozpouštědla. Ve vodném gelcastingu se běžně jako monomery používají akrylamid (AM) a methylenbisakrylamid (MBAM) pro přípravu monomerních roztoků [9].

V poslední době byly zkoumány monomerní systémy jiné než akrylamid, které mají nízkou toxicitu [9]. Výsledkem zkoumání byly vyvinuty systémy odlévání gelů, které mají velmi nízkou toxicitu. Nejužitečnější systémy byly složeny z hlavních jednoduchých monomerů, jako jsou například, methakrylamid (MAM), methoxy-polyethylenglykol-monomethakrylát (MPEGMA) a n-vinylpyrrolidon (NVP), v kombinaci se zesítujícími monomery jako methylenbisakrylamid (MBAM) a polyethylenglykoldimethakrylát

(PEGDMA). V těchto systémech byly vyhodnoceny jako nejvíce vyhovující následující iniciátory: amonium persulfát/tetramethylethylendiamin (APS-TEMED), azobis [2-(2-imidazolin-2-yl) propan] HCl (AZIP) a azobis (2-amidinopropan) HCl (AZAP) [10, 11]. Gely bývají vyrobeny z 15 % hmotnostních roztoků monomerů a zesíťovacích monomerů. Poměr monomeru a zesíťovacího monomeru se uvádí 6:1 pro MBAM a 3:1 pro PEGDMA. Žádný z monomerů nebo iniciátorů nepůsobil nepříznivým vlivem na standardní zpracování keramiky [10, 11]. Rovněž byly v článku [10] vyhodnoceny jednotlivé kombinace (jednoduchý monomer/síťující monomer/iniciátor) vzhledem k relativní pevnosti výsledného neslinitého tělesa, pomocí Taguchiho metody. Přehled kombinací s největší pevností neslinitého tělesa je v tabulce 1.



Obr. 6 Obecný diagram postupu gelového lití [4]

Tabulka 1 Přehled kombinací (monomer/sít'ující monomer/iniciátor) vzhledem k nejlepší relativní pevnosti neslinitého tělesa [10]

Hlavní monomer	Zesít'ující monomer	Iniciátor
MAM	MBAM	APS-TEMED
MAM	PEGDMA	AZIP
MPEGMA	MBAM	AZIP
MPEGMA	PEGDMA	AZAP
MPEGMA/NVP	MBAM	AZIP
MPEGMA/NVP	PEGDMA	AZAP

Prostředí a reakce gelace

Proces gelace se skládá z polymerace monomerů do hydrogelu. V závislosti na množství a poměru hlavního monomeru a sít'ovadla se vytvoří tuhá složka. Polymerace je spuštěna přidáním iniciátoru (popř. v kombinaci s urychlovačem) do suspenze těsně před odléváním a zahříváním [2].

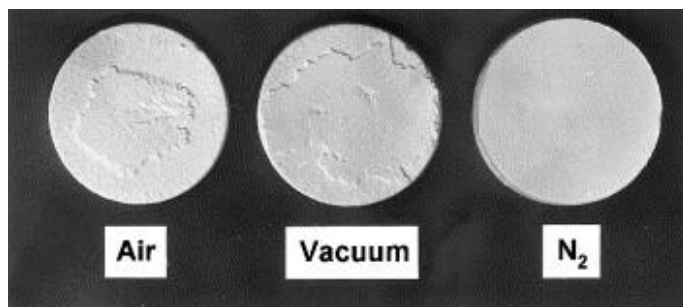
Přidání iniciátoru bude mít za následek homogenní gelování celého objemu suspenze. Nevýhoda použití iniciátoru spočívá v tom, že suspenze, která zůstává v přípravné nádrži, případně v systému který napájí formu, ztuhne také a bude obtížné jej vyčistit [2]. Zahřívání má za následek vznik želatinové reakce, která začíná na vnější vrstvě komponenty, a probíhá s exotermickou povahou polymerizační reakce směrem k vnitřním částem tělesa. Při zahřívání tenkostěnných komponent se obvykle nevyskytují problémy. Nicméně u komponent se silnějšími stěnami dochází při sušení k praskání těles. Povrch trhliny vykazuje typické vzory, které mohou souviset s radiálním namáháním. Původ tohoto pnutí spočívá v předčasném gelování povrchu suspenze, který ji pak blokuje v kapalném stavu. Následující postupná gelace pravděpodobně vede ke zvyšování pnutí a vzniku trhlín [2].

Podobně jako u jiných procesů tak i při gelcastingu je přítomnost vzduchu zachyceného v suspenzi během procesu odlévání nežádoucí, především kvůli pórům, které se mohou vytvořit v odlitém tělese. Tyto póry působí nepříznivě a negativně ovlivňují mechanické chování výsledného produktu po slinování. Dalším škodlivým účinkem zachyceného vzduchu, specifického pro gelcasting, je omezení polymerizační reakce díky působení kyslíku [2].

Prostředí (typ atmosféry) pro gelcasting je dalším důležitým parametrem zpracování, který je třeba vzít v úvahu. V práci [9] byla provedena gelace Al_2O_3 při třech různých atmosférách, a to vzduchu, vakuu (38 Pa) a N_2 s cílem nalézt vliv typu atmosféry na výsledný povrch.

Jak je patrné z obr. 7, vzorky zgelovatělé na vzduchu a vakuu vykazovaly po vysušení exfoliaci povrchů vystavených atmosféře během gelcastingu. Ačkoliv vnitřek vzorků byl tuhý, povrchové exfoliované oblasti byly křehké, což znamenalo selhání tvorby silné

pojivové sítě in situ polymerací monomerů. Naproti tomu vzorek zgelovatěný v N₂ atmosféře má dobrou tuhost celého tělesa a nevykazuje žádné známky exfoliace [9].



Obr. 7 Srovnání vzhledu vzorků po vysušení zgelovaných na vzduchu (air), ve vakuu (vacuum) a v atmosféře dusíku (N₂) [9]

Rozpouštědla

Rozpouštědla lze rozdělit do dvou skupin, a to vodná a organická. Vodná rozpouštědla zajišťují tekutost suspenze a na rozdíl od organických rozpouštědel je jejich odstranění bez problémů a environmentálních rizik. Organická rozpouštědla potřebují nízký tlak nasycené páry při teplotě sítování a relativně nízkou viskozitu. Mezi zástupce organických rozpouštědel patří např. ftalátové a dvojitě estery, petrolejová rozpouštědla apod. Jejich odstranění může vést k environmentálním problémům a možnému navýšení nákladů. Ve snaze se těmito problémům vyhnout a vzhledem k faktu, že voda jako rozpouštědlo je oblíbenější [12], začala se jako rozpouštědlo používat převážně voda.

Reologie keramické suspenze pro metodu gelového lití

Pro keramické suspenze je zásadní obsah keramického prášku, který by měl být co nejvyšší. Obsah keramického prášku v suspenzi má vliv na pevnost polotovaru a konečné vlastnosti výrobku. Čím vyšší je obsah keramického prášku v suspenzi, tím nižší bude následné smrštění při sušení a po slinování. Ideální jsou suspenze s obsahem prášku nad 50 obj. % [12].

Sušení a odstraňování pojiva

Nevysušené gelové těleso obsahuje stejné množství vody jako výchozí suspenze. Tato voda musí být odstraněna krokem sušení, který představuje nejkritičtější část procesu, stejně jako odstraňování pojiv u technologie vstřikování [2]. Nejkritičtější část procesu je to kvůli smrštění, ke kterému dochází při eliminaci vody k povrchu a následnému odpařování. Když těleso dosáhne takové hustoty, že se jednotlivé keramické částice začnou dotýkat, dochází k zastavení smršťování. Od této chvíle lze zvýšit rychlost sušení [2]. Aby se zabránilo deformaci a praskání tělesa důsledkem rychlého vysychání, musí být gelové těleso vysušeno v komoře s pokojovou teplotou a řízenou s relativní vlhkostí nad 90 % až do úplného smrštění [2, 9, 12].

Po vysušení se tělesa dále zpracovávají obvyklým způsobem. Pojivo může být odstraněno žíháním na vzduchu, nebo ve slinovací peci. Po vyhoření pojiva mohou nejmodernější

slinovací procesy dále konsolidovat keramický polotovar na téměř teoretickou hustotu tělesa [2].

Formy pro odlévání

Gelcastingové formy jsou neporézní formy. Mohou být vyráběny ze široké škály materiálů včetně kovů, skla a polymerních materiálů. Nicméně musí splňovat určité požadavky [2]. Musí být navrženy tak, aby nedošlo k úniku suspenze po odlití. Musí umožnit vyjmutí všech částí tvarového tělesa a nesmí zabraňovat či jinak omezovat gelaci. To se týká především silikonových materiálů. Po odlití suspenze, zůstává ve formě spolu se zgelovatěným tělesem nezreagovaná vrstva na rozhraní mezi stěnou silikonové formy a tělesem. Pro snadné vyjmutí odlitých těles, je mnohdy zapotřebí účinných prostředků pro uvolňování forem. Toho lze dosáhnout též rozebíratelnou formou, pak ovšem nelze dosáhnout rozměrových přesností. Další z možností je použití různých činidel pro uvolnění tělesa z formy, to ovšem může vést k omezení polymerizační reakce [2, 3].

2.2 Obrábění keramických materiálů

Součásti vyráběné at' už z oxidových či neoxidových keramických materiálů, jsou vyráběny pokud možno co nejpřesněji, aby se omezilo následné obrábění [13]. Nedávno byl prokázán zvýšený zájem o používání keramických materiálů v medicíně, zejména pro implantáty. Zájem o ně je projevován vzhledem k vlastnostem, jako jsou dobrá trvanlivost, vysoká kvalita zpracování a osvědčená biokompatibilita. Obvyklý přístup při přípravě keramických implantátů spočívá ve vytvoření modelu anatomické struktury a následně je podle tohoto modelu připravena forma, která slouží k výrobě odlitku dané anatomické části. I přes skutečnost, že je možné z keramických materiálů vyrábět téměř čisté tvary lisováním, odléváním a následným slinováním, jsou aplikace, které vyžadují zajištění rozměrové a geometrické přesnosti keramické součásti. Klíčem k přesným rozměrům jsou procesy obrábění. Proto je důležité posoudit obrobiteľnost materiálu a optimalizovat parametry obrábění [14].

Keramika je materiál s velmi špatnou obrobiteľností. Vzhledem k této vlastnosti je třeba se zaměřit na problémy, které z ní plynou. Jedním z těchto problémů je *výběr vhodné obráběcí metody*, podle stavu ve kterém bude keramika obráběna. Pokud se nejedná o výrobu kusovou, je třeba zvážit další problém, a to *účinnost dané metody v podmínkách hromadné výroby*. Obrábění keramických materiálů je, díky jejich špatné obrobiteľnosti, velmi náročné pro nástroje a mnohdy i velmi nákladné. *Výběr odpovídajících řezných podmínek a úběr materiálu* je jedním ze zásadních problémů při obrábění keramik. Neméně důležitá je *volba nástrojů a obráběcích strojů*, které budou pro tuto činnost používány. Následně se po vyřešení předchozích problémů, lze zabývat výsledným stavem obrobku po skončení obrábění. Jedním z hodnocených parametrů je *integrita obrobených ploch, což je stav povrchu a jeho drsnost a mezní dosažitelné rozměrové tolerance* [15].

Hlavním důvodem k optimalizaci parametrů obrábění je minimalizace výrobních nákladů a zároveň dosažení obrobku s požadovanými rozměry a odpovídající kvalitou [14]. Obrábění keramik lze uskutečnit jak v surovém neslinutém „green“ stavu, tak ve vyžíhaném nebo slinutém stavu. [13]

2.2.1 Obrábění keramiky ve slinutém stavu

Jde o metodu, kdy je materiál zcela slinut a dosahuje vysoké tvrdosti. Obrábění (frézování) vzorků v tomto stavu je velmi obtížné a vede k brzkému zničení nástroje. Obrábění slinutých součástí obvykle vyžaduje diamantové nástroje kvůli vysoké tvrdosti keramiky. Je omezeno na abrazivní operace, jako je např. broušení. Technologie jako soustružení, vrtání nebo frézování, které se běžně používají pro tváření kovů, nelze použít pro obrábění keramiky kvůli její křehké povaze. Obrábění ve zcela slinutém stavu se nedoporučuje hlavně kvůli vysoké míře opotřebení nástroje, která následně vede k problémům při dalším zpracování polotovarů [16]. Jakékoliv vady na obráběném povrchu výrazně snižují pevnost hotového výrobku a je vyžadován další krok pro zlepšení kvality povrchu [17].

Plně slinuté dílce jsou náchylnější na výskyt povrchových defektů, snižují životnost diamantových nástrojů a zvyšují čas a náklady spojené s výrobou [5, 18]. Keramika je v důsledku frézování např. pomocí technologie CAD/CAM vystavena různým druhům poškození povrchu, např. zanechávání stop po nástroji na obrobeném povrchu [19, 20].

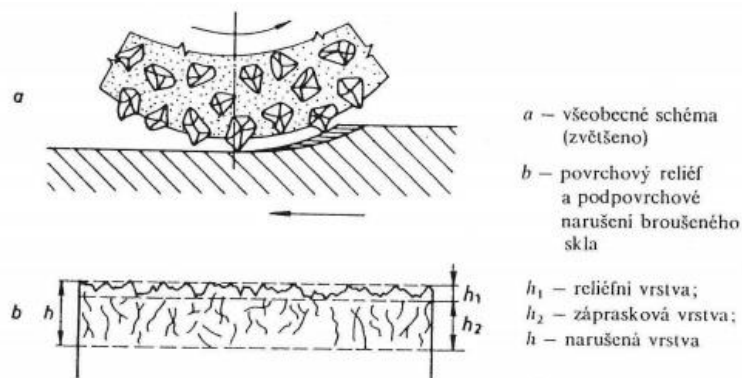
Broušení

Broušení je téměř jediná operace vhodná pro obrábění keramiky ve slinutém stavu [18, 21]. Proces broušení se používá při přesném obrábění keramiky. Parametry broušení pokročilé keramiky jsou velmi odlišné od kovů. Proces broušení vytváří v keramice defekty ovlivňující pevnost. Pro zabránění těchto defektů je nutné použití dalších metod, jako je lapování nebo leštění. Konvenční metody broušení keramiky za použití diamantového kotouče [22] nebo lapování jsou velmi pomalé a drahé. To je způsobeno křehkostí a vysokou tvrdostí keramických materiálů. Rovněž je známo, že křehkost a vysoká tvrdost mohou způsobit degradaci pevnosti v důsledku tvorby povrchových a podpovrchových trhlin a dalších defektů [23].

Broušení je mechanické narušování povrchu a odstraňování drobných částic materiálu vlivem velkého množství brusných zrn. Pohyb brusných zrn a jejich kontakt a silové působení na obrobek je vytvářeno brusným nástrojem, viz obr. 8. Nástroj je na povrch obrobku přitlačován a současně vůči povrchu provádí posuvný pohyb poměrně vysokou rychlostí (několik metrů až desítek metrů za minutu). Pro broušení skla a keramiky jsou jako brusiva využívány sloučeniny jako korund křemíku, nebo diamant. Podle způsobu použití mohou mít brusná zrna velikost od jednoho až po několik set mikrometrů.

Přestože je diamantové broušení používáno pro více než 80 % veškerého obrábění prováděného na pokročilých keramikách, vede k jejich poškozování. Současně je proces broušení omezen složitostí tvarů, které lze vyrobit [24–26].

Kromě konvenčního způsobu broušení se používají i nekonvenční obráběcí procesy pro zpracování pokročilé keramiky, jako je ultrazvukové obrábění, obrábění elektrickým výbojem (EDM), obráběním laserovým paprskem (LBM), elektrochemickým obráběním (ECM) a obráběním s abrazivním paprskem (AJM) [27]. Nicméně hlavními omezeními při používání těchto technik jsou vysoké počáteční investiční náklady a omezení typů materiálu, které lze obrobit [24, 26].



Obr. 8 Schematické znázornění technologie broušení [6]

2.2.2 Obrábění keramiky v neslinutém a vyžihaném stavu

Obrábění keramiky před slinutím (tj. v neslinutém stavu) představuje alternativu k jiným tvarovacím procesům a nabízí vysoký stupeň flexibility a ekonomické účinnosti při obrábění keramických dílů [24]. Ačkoliv byly gelové odlitky vyvinuty jako způsob přesného tvarování, může být obrábění gelových odlitků v neslinutém stavu zvláště užitečné pro výrobu keramických komponent a pro rychlou výrobu keramických prototypů [5]. CNC technologie obrábění byla použita pro obrábění vzorků v neslinutém stavu a získání složitých tvarů v konkrétních lékařských a technologických aplikacích, jako jsou například ortopedické implantáty a zubní korunky [28].

Hnací silou pro obrábění keramiky v neslinutém stavu jsou podstatně nižší energetické nároky a menší opotřebení nástroje. Tento způsob obrábění je preferován oproti obrábění vzorků ve stavu slinutém v případě potřeby odstranění většího množství materiálu. Také je vhodný pro automatizovanou výrobu z CAD/CAM souborů. Výhodou je rovněž využívání standardních zařízení, která jsou již dlouhou dobu používána v kovoprůmyslu [29].

Tyto skutečnosti byly hlavním důvodem pro zavedení obrábění keramiky v neslinutém stavu v komerčním měřítku s několika různými operacemi. Vrtání, broušení, frézování, a soustružení jsou operace vhodné pro obrábění keramiky v neslinutém stavu. Pro velký úběr materiálu jsou preferované obráběcí operace jako frézování nebo soustružení [21].

Z dostupné literatury a předběžných studií jsou známy důležité parametry materiálu a stroje, které ovlivňují chování obrábění neslinutých keramických kompaktních - obsah pojiva a jeho povaha, velikost částic prášku a jeho rozdispergování, povaha případných

aglomerátů, obsah pevné fáze v suspenzi, hustota a pevnost neslinutých vzorků, otáčky nástroje, rychlost posuvu nástroje při obrábění a hloubka obrábění [21].

Ve srovnání s jiným způsobem tváření dílů vykazuje obrábění v neslinutém stavu technologií CAD/CAM vyšší rozměrovou přesnost a lepší povrchovou úpravu. CAD/CAM rovněž snižuje časovou náročnost obrábění keramických dílů. Jde o metodu, při které jsou použity dílce v neslinutém nebo vyžíhaném stavu, kdy je vzorek materiálu vyžíhán na danou teplotu. Metoda je rovněž nazývána jako měkké obrábění. Neslinutá „green“ keramika je poměrně křehká a při upínání keramického obrobku do upínacích pomůcek je nezbytná velká opatrnost. Kromě toho musí být parametry obrábění pečlivě kontrolovány, aby nedošlo k přetížení křehkého materiálu, což může mít za následek praskliny, zlomení nebo špatnou kvalitu povrchu. Upínání nebo držení keramického kompaktu pro obrábění je typickým problémem kvůli jeho křehkosti. Pro obrábění však musí být obrobek pevně umístěn a to bez deformace nebo koncentrace napětí. Obtíže vznikají nejen v souvislosti s upínáním a manipulací, ale také s ohledem na měření kvality povrchu. Abrasivní charakter prášku z keramických materiálů vede nejen k vysoké úrovni opotřebení nástrojů, ale vyžaduje také úpravy konstrukce stroje, aby bylo možné obrábění keramiky v nevyžíhaném stavu. Prachové částice, které vznikají u keramických materiálů na místo třísky, se mohou během obrábění přilepit k povrchu obrobku. Následkem takového nalepení může být zvýšené opotřebení nástroje. Abrasivní účinek částic a s ním související opotřebení nástroje, negativně ovlivňuje přesnost obráběcího stroje [24]. Při obrábění vyžíhaných těles se vyskytují řezné mechanismy, které jsou odlišné od obrábění vzorků v neslinutém stavu. Při obrábění vzorků ve vyžíhaném stavu dochází k mikrotrhlinám, způsobeným křehkými zlomeninami ve slabých vazbách kolem nově vytvořených krčků mezi částicemi [28].

Hlavní výhodou měkkého frézování ve srovnání s tvrdým frézováním je skutečnost, že po výrobě je součást podrobena konečnému slinování, které odstraní případné napětí, vyvolané frézováním [5, 18]. Dále by se smrštěním při slinování mohly minimalizovat trhliny a podpovrchové vady vytvořené během obrábění. Jak bylo zmíněno výše, stále je řada zásadních otázek, které je třeba při výrobě komponentů prostřednictvím obrábění keramických materiálů v neslinutém stavu zvážit. Od výroby vhodných držáků a uchycení křehkých nevyžíhaných vzorků během obrábění, rozměrovou přesnost a stálost implantátů po slinování až po navrhování obráběcích nástrojů poskytujících odpovídající povrchovou úpravu [20].

Frézování

Frézování je považováno za všestranný a rychlý způsob obrábění kovových materiálů. Kvalita povrchů vytvářených frézováním je obvykle lepší než kvalita obráběných ploch jinými metodami jako je soustružení nebo vrtání. Požadovaná kvalita povrchu je u frézování obvykle dosažena už po prvním kroku.

Frézováním lze zcela eliminovat případné následné procesy, nebo výrazně omezit jejich čas. Využitím nedávno vyvinutých řezných nástrojů a technik optimalizace řezných

parametrů lze dosáhnout výrazné kvality povrchové úpravy i u keramických materiálů. To výrazně snižuje náklady na celkový proces obrábění bez ohrožení kvality výrobku. Během frézování dochází k problému štěpení hran, na které obráběné keramické materiály trpí. Nechtěné odštípnutí materiálu je způsobeno zejména nepřiměřeným kontaktem řezného nástroje a obrobku [23].

Frézování je obrábění vnitřních a vnějších rovinných nebo tvarových ploch jednobřítým či vícebřítým nástrojem, tedy frézou. Technologie je určena pro kovové materiály (třískové obrábění), pro keramiku je to *opracování s oddělováním malých částic*. Hlavní pohyb frézy je rotační. Posuv při obrábění koná nejčastěji obrobek, většinou ve směru kolmém k ose nástroje. Moderní frézovací stroje umožňují plynule měnitelné posuvy ve všech směrech.

Základní řezné podmínky pro obráběný materiál a používaný frézovací nástroj jsou: řezná rychlost v_c [$m \cdot \text{min}^{-1}$] a posuv na zub f_z [mm]. Dále je také předepisovaná rychlost posuvu v_f [$mm \cdot \text{min}^{-1}$]. Při určování řezných podmínek se musí brát v úvahu druh operace, druh používané frézy, a výsledná jakost obrobeného povrchu.

Stanovení řezné rychlosti v_c je možné ze vztahu:

$$v_c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

kde D = průměr nástroje [mm]

n = otáčky vřetene [min^{-1}]

Pro určení rychlosti posuvu v_f slouží následující vztah:

$$v_f = f_z \cdot z_{eff} \cdot n [mm \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2)$$

kde f_z = posuv na zub [mm]

z_{eff} = počet efektivních břitů na nástroji [-]

n = otáčky vřetene [min^{-1}]

Výpočet posuvu na zub f_z a posuvu na otáčku f_n lze získat ze vztahů:

$$f_z = \frac{v_f}{z_{eff} \cdot n} [mm] \quad (3)$$

$$f_n = \frac{v_f}{n} [mm] \quad (4)$$

kde v_f = rychlost posuvu [$mm \cdot \text{min}^{-1}$]

z_{eff} = počet efektivních břitů na nástroji [-]

$n = \text{otáčky vřetene } [\text{min}^{-1}]$

Pro výpočet velikosti úběru materiálu Q slouží vztah:

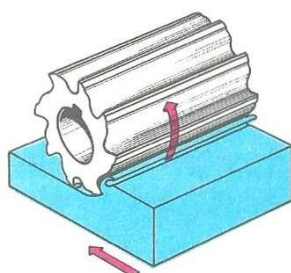
$$Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} [\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (5)$$

kde $a_e = \text{pracovní (boční) záběr } [\text{mm}]$

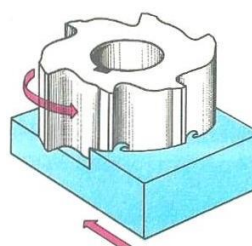
$a_p = \text{hloubka záběru } [\text{mm}]$

$v_f = \text{rychlost posuvu } [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$

Rovinné plochy jsou frézovány především čelními frézami a tvarové plochy frézami tvarovými. Frézování se rozděluje na dva základní typy: *frézování obvodem válcové frézy* (obr. 9) a *frézování čelem čelní frézy* (obr. 10), tento typ obrábění se využívá přednostně [13, 31].

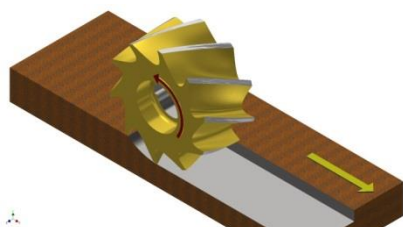


Obr. 9 Frézování obvodem válcové frézy [31]

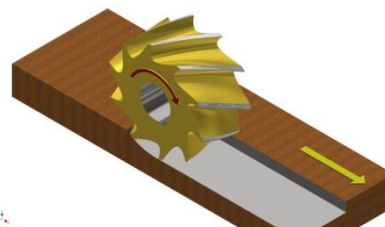


Obr. 10 Frézování čelem čelní frézy [31]

Dále se frézování dělí podle smyslu otáčení frézy vůči posuvu pracovního stolu. Dělí se rovněž na dva typy. První z nich je *sousledné frézování*, kdy se frézka otáčí ve směru posuvu obr. 11. a *nesousledné frézování*, kde se fréza otáčí proti směru posuvu, viz obr. 12.



Obr. 11 Sousledné frézování [31]



Obr. 12 Nesousledné frézování [31]

Stroje pro frézování

Pro technologii frézování jsou používány stroje nazývané frézky. Trh nabízí mnoho modelů a velikostí těchto strojů spolu s rozsáhlým příslušenstvím. Frézky se dělí do čtyř základních skupin – stolové, konzolové, rovinné a speciální. Podle řízení frézky se rozdělují na manuální, tedy ručně ovládané a řízené programově [31]. Tato práce se zabývá obráběním na programovatelné CNC frézce, proto na ni bude zaměřena následující kapitola.

CNC frézka

CNC (Computer Numerical Control) stroj, dále jen CNC, je charakteristický tím, že veškeré ovládání funkcí stroje je prováděno řídicím systémem, pomocí vytvořeného programu. Program je napsán pomocí alfa-numerických znaků, kterými jsou popsány informace o požadovaných činnostech stroje. Vlastní program je určen posloupností určitých skupin znaků, které jsou nazývány bloky nebo věty. Typickým představitelem CNC stroje je např. soustruh nebo frézka. Frézku lze programovat i pomocí tzv. CAD/CAM systémů. Jedná se o systémy, které provádějí vyšší stupeň počítačové podpory, než je tomu u klasického ručního obrábění. Výkres, který byl vytvořen v CAD systému, lze použít i pro zpracování programu v CAM modulu. Díky těmto systémům odpadají programátorské činnosti jako např. popis dráhy, možnosti cyklů atd. Pomocí systému a výkresu, se vygenerují automaticky ze zadávaných příkazů a převzatého výkresu z CAD systému nebo z 3D modelu.

Pomocí CAD/CAM systémů lze vytvářet mnoho různých strategií pro obrábění. Při výběru vhodné strategie můžeme snížit výrobní čas, zlepšit kvalitu povrchu apod. Rovněž lze vytvořit a naprogramovat dráhu nástroje [32, 33].

Vliv parametrů obrábění na kvalitu obroběných součástí

Kvalita povrchu

Denry a kol. [34] se ve své práci zabývají hodnocením několika druhů ZrO₂ stabilizovaných 3 mol.% yttriem pro použití v dentálních aplikacích. Závěrem studie byl poznatek o důležitosti velikosti zrna, kdy jemnozrnnost materiálu vede k hladkým povrchům. Autoři také konstatovali, že teplota vyžhání má významný vliv na obrobitelnost vzorků, a že vyšší teplota vyžhání vede k hrubším povrchům. Drsnost je jedna ze zkoumaných charakteristik obrábění. Zdroj [35] uvádí následující nejlepší dosažené parametry: $R_a = 0,2 \mu\text{m}$, $R_z = 1,6 \mu\text{m}$ a $R_t = 2,3 \mu\text{m}$. Drsnosti byly měřeny ve dvou na sebe kolmých směrech. Tyto hodnoty drsnosti lze dosáhnout i broušením. Tvorba povrchových vad a trhlin je také velmi diskutované téma. Jedna ze studií [30] uvádí tvorbu povrchových vad a mikrotrhlin v důsledku obrábění vzorků ZrO₂ stabilizovaných yttriem, uvádí přítomnost mikrotrhlinek od 2 do 15 μm po obrobení vzorků. Závěrem je zmíněna nezávislost parametrů obrábění a velikost prasklin na povrchu vzorků.

Kromě ZrO_2 jsou obráběny a hodnoceny další materiály. Například práce [14] hodnotí drsnost povrchu HA ve dvou na sebe kolmých směrech stejně jako v případě ZrO_2 , a to ve směru a kolmo na směr obrábění. Práce popisuje několik variant obráběcích parametrů. Nejlepší dosažené hodnoty uvádí: $R_a = 88,04 \mu m$ dosažené řeznými parametry: rychlost posuvu 5,27 mm/min, hloubka řezu 0,08 mm a řezná rychlost 3,33 m/min. Nejhorší hodnoty $R_a = 100,04 \mu m$ byly dosaženy při dvojnásobných parametrech, tj. rychlost posuvu 10,81 mm/min, hloubka řezu 0,16 mm a řezná rychlost 3,33 m/min. Jak vyplývá z výše zmíněných faktů, parametry obrábění mají významný vliv na výslednou kvalitu povrchu HA. To také potvrzuje studie [36], která uvádí závislost mezi řeznými parametry a parametrem drsnosti R_a . Ke snížení parametru R_a dochází se zvýšením řezné rychlosti, naopak ke zvýšení R_a dochází při zvětšení úběru materiálu. Hodnoty drsnosti u všech experimentů se pohybovaly od 0,5 do 1,5 μm a byly měřené na délce 4 mm. Povrch obrobeného vzorku HA neobsahoval žádnou prasklinu.

Mohanty a kol. [20] uvádí hodnoty drsnosti povrchu, R_a , obrobené dentální korunky z Al_2O_3 $0,35 \pm 0,03 \mu m$ a $0,18 \pm 0,07 \mu m$. Jiná studie [37] prokázala, že při slinování vzorků z Al_2O_3 za teploty 1500 °C při rychlosti 3 °C/min, nebyly pozorovány žádné viditelné mikrotrhliny. Stejně jako v předchozích dvou případech, byla i u vzorků Al_2O_3 hodnocena drsnost povrchu po obrobení kolmo na směr obrábění. Zjištěním byla přítomnost stop po nástroji na povrchu vzorku i po slinování. Naproti tomu vzorky obrobené laserem vykazovaly hrubý povrch bez pravidelností a viditelných stop po působení laseru. Závěrem autoři uvádí vyšší údaj drsnosti u povrchu obrobeným laserem: v neslinutém stavu 0,6715 μm a ve slinutém stavu 0,6334 μm . Drsnost povrchu R_a , po obrábění technologií CNC byla v neslinutém stavu 0,4372 μm a ve slinutém stavu 0,4066 μm [38].

Pevnost keramických obrobků

Wang a kol. [19] ve své studii pozoroval změnu pevnosti materiálu s ohledem na druh použitého obrábění pro zpracování CAD/CAM technologií. Čtyři typy tyčí vyrobených ze ZrO_2 materiálu byly následně obrobeny broušením Al_2O_3 částicemi s různou zrnitostí. Výsledkem byla závislost pevnosti materiálu na míře poškození povrchu. Hodnoty drsnosti povrchu byly nejnižší u tyče leštěné a největší u tyče s nejhrubším obráběním.

Opotřebení nástroje

Faktor přímo související s kvalitou obrobeného povrchu je opotřebení nástroje. Zdroje se shodují v upřednostnění obráběcího nástroje s diamantovým povlakem vůči ostatním. Je to především díky jeho odolnosti proti opotřebení při obrábění keramických materiálů, zejména pak Al_2O_3 [20, 39]. Dalším typem nástroje je kuželová fréza, kde jsou v matici jemné diamantové částice [38]. Parametry obrábění mají přímo vliv na kvalitu obrobeného povrchu i na opotřebení obráběcího nástroje. Lee a kol. [39] ve své práci zabývající se obráběním vzorků z Al_2O_3 došel k závěru, že při rychlosti posuvu 17 mm/min, dosáhne největšího úběru materiálu. Konstatoval, že jeho životnost se lineárně snižuje s rostoucím počtem otáček. Další poznatek obrábění Al_2O_3 uvádí práce

[16]. V tomto případě byl u vzorků Al_2O_3 použit jako pojivo kyanoakrylát. Ukázalo se, že při zvýšení otáček obráběcího nástroje nad 2000 ot/min. lepší zmíněné pojivo frézu.

Obrábění HA pro medicínské aplikace bylo provedeno pomocí CNC technologie, za použití ploché frézy o průměru 4 mm s povlakem ze slinutých karbidů, jako obráběcího nástroje. Ve zdroji [14] byl tento nástroj vyhodnocen jako problematický, protože vykazoval časté opotřebení. Byly pozorovány znatelné praskliny a zlomeniny na konci špičky nástroje. Existují i zmínky o použití plochého obráběcího nástroje s povlakem karbidu wolframu [36]. Zmíněná práce ovšem neuvádí jeho případné opotřebení.

Štěpení hran

Shin a kol. [40] ve své práci obrábí a následně hodnotí povrch u ZrO_2 a Al_2O_3 keramik. Autoři hodnotili obrábění keramik v nevyžíhaných i vyžíhaných stavech. Výsledkem bylo vyhodnocení důvodu štěpení okrajů hran během obrábění. Důvodem byla nízká teplota vyžíhání a nízké otáčky za minutu, které vedou k nadměrnému štěpení. Rovněž pozoroval rozdíl v odštípaných okrajích mezi stranami. Došel k závěru že záleží na vjezdu příp. výjezdu nástroje z materiálů. Vzorky vyžíhané na vyšší teplotu nevykazují žádné štěpení nebo povrchové zlomeniny v blízkosti okrajů.

Životnost keramických obrobků

Životnost keramik v dentálních aplikacích uvádí studie [41]. Zabývá se zhodnocením stavu dvaceti zubních náhrad po třech letech od aplikace. Hodnotilo se umístění implantátu, barva, okrajová integrita a možný výskyt kazu. Implantáty byly vyrobeny z keramického prášku ZrO_2 stabilizovaného 3 mol.% Y_2O_3 . Zubní náhrady byly vyrobeny pomocí CAD/CAM technologie. Materiál byl zvolen s ohledem na estetický efekt a nízkou průsvitnost. Minimální tloušťka stěny implantátů byla 0,6 mm pro aplikaci v přední části ústní dutiny a 0,7 mm pro umístění v zadní části. Zubní náhrady byly slinuté na 1500 °C. Zhodnocení implantátů dopadlo výborně, nastaly pouze dvě nutné opravy. Jediný zásadní problém byl s odolností proti zlomení implantátu. Zatížení při zlomení implantátu uvedené v práci, bylo extrémně nepravděpodobné vzhledem k běžnému užívání. Autor ovšem doporučuje, mít toto riziko na paměti.

2.3 Příprava keramik tvarováním bez forem a jeho srovnání s frézováním

Výroba keramických dílů bez forem (SFF), která se objevuje v 80. letech 20. století, je přístup k výrobě dílů nebo prototypů přímo z počítačem navrženého CAD souboru bez nástrojů a forem. Jde o významnou změnu v přístupu k výrobní technologii a efektivitě výroby. Mnoho zemí uznává význam této nové tvářecí technologie, která byla považována za významný průlom v oblasti výroby [4]. Jedná se o technologie „výroby po vrstvách“ (AM) a byly vyvíjeny více než 25 let. Procesy AM jsou užitečné při výrobě 3D dílů přímo z CAD modelů. Principem metody je spojování jednotlivých vrstev materiálu. Tato metoda nabízí možnost, vytvářet díly s přesnou geometrií a materiály které by nemohly být vytvořeny běžnými výrobními postupy. Aplikace vytvořené metodou AM jsou využívány v automobilovém, energetickém, kosmickém a biomedicínském průmyslu

[4, 42, 43]. K dnešnímu dni bylo vyvinuto několik technik SFF, depozice pomocí roztaveného materiálu (FDM), laserové tvarování (LENS), stereolitografie (SLA) a selektivní laserové vytvrzování (SLS) [4, 43]. Další ze zajímavých technologií je metoda obětovaných forem [4].

Výhody technologie AM v porovnání s běžným obráběním jsou následující:

Úspora materiálu je velká výhoda v porovnání s běžnou výrobou. Při klasickém obrábění je třeba odstranit velké množství materiálu pro získání požadovaného tvaru součásti. AM efektivně využívá suroviny tím, že vytváří vrstvu za vrstvou o požadovaném tvaru. Následně jsou tedy provedeny jen drobné úpravy, jsou-li vyžadovány. Další výhodou je *úspora ekonomická a energetická*. Provoz běžného konvenčního obrábění vyžaduje vedle hlavního obráběcího stroje ještě další pomocné zdroje, jako jsou řezné nástroje, chladicí kapaliny apod. AM tyto další zdroje nevyžaduje. Proto poskytuje jak ekonomickou tak energetickou úlevu. *Výroba složitých tvarů o různých vlastnostech* je další výhodou AM. Díly mohou být vyrobeny z jednoho jediného kusu. Dále je možné sestavit jednu část s různými mechanickými vlastnostmi, např. flexibilní v jedné části a tužší v jiné části. V neposlední řadě lze mezi výhody AM zařadit i *nenáročnost na obsluhu*. Kvalita součástí závisí spíše na daném procesu než na dovednostech operátora [43].

Technologie AM však stále nemůže plně konkurovat konvenční výrobě, zejména v hromadné výrobě, kvůli následujícím nevýhodám. *Omezení velikosti* je jedna z nich. AM procesy často používají kapalné polymery a prášek složený z pryskyřice či sádry pro vytvoření jednotlivých vrstev. Tyto materiály způsobují, že technologií AM nelze vyrábět velké objekty kvůli nedostatku pevnosti materiálu. Další nevýhodou je *výsledná zvýšená drsnost výrobku*. Součásti vyráběné pomocí procesů AM mají drsnou a žebrovanou povrchovou úpravu. Tento vzhled je způsoben skládáním jednotlivých vrstev do požadované tloušťky a tvaru. Mezi nevýhody patří rovněž i pořizovací cena této technologie. Zdroje uvádějí pořizovací cenu 3D tiskáren pro AM technologii v řádech statisíců Kč [43].

3 Cíle práce

Cílem diplomové bylo zjistit souvislosti mezi zvolenými strategiemi obrábění, typy keramických polotovarů a výslednou kvalitou povrchu keramických dílů. Byly stanoveny dílčí cíle:

- Zhodnocení homogenity a stanovení nasákavosti polotovarů ZrO_2 a Al_2O_3 vytvořených metodou gelcasting.
- Zjištění vlivu obráběcích strategií na kvalitu plochy povrchu horizontálně a vertikálně obráběných ploch.
- Zjištění souvislosti mezi teplotou vyžhání připravených polotovarů a jejich obrobiteľností.
- Zhodnocení opotřebení obráběcích nástrojů.

4 Experimentální část

4.1 Příprava polotovarů pro obrábění

4.1.1 Použité materiály

Pro přípravu zkušebních těles byly zvoleny keramické prášky ZrO₂ TZ-3YS-E od výrobce Tosoh a Al₂O₃ HP DBM od výrobce BaikaloX. Měrný povrch prášku ZrO₂ byl 6,5 m²/g a u prášku Al₂O₃ byl 7,61 m²/g.

K přípravě gelu byl namíchán monomer ze dvou složek a to methakrylamid (MAM) - lineární monomer a methylenbisakrylamid (MBAM) - síťující monomer. Použité monomery měly následující čistotu: MAM o čistotě 99% od výrobce Sigma-Aldrich, a MBAM o čistotě 98% od výrobce Sigma-Aldrich.

Pro stabilizaci suspenze byl použit disperzant Dolapix CE 64 od výrobce Zschimmer&Schwarz. Pro vznik iniciace polymerace byl použit peroxodisíran amonný (APS) o čistotě ≥ 98% od výrobce Sigma-Aldrich.

4.1.2 Příprava suspenzí a zkušebních těles

Suspenze ZrO₂ a Al₂O₃ byly připraveny dle složení uvedeného v tabulce 2.

Tabulka 2 Složení jednotlivých suspenzí pro přípravu keramických polotovarů

Typ prášku/Složení suspenze	Čisté monomery [g]	H ₂ O [ml]	Dolapix [μl]	Hmotnost použitého prášku [g]	Roztok 5% APS ve vodě [μl]	Spinel MgO [g]
ZrO ₂	9,69	54,9	1368	328,32	446	-
Al ₂ O ₃	5,53	31,4	704	168,75	411,4	0,296

Postup při přípravě keramické suspenze

1. Prvním bodem přípravy keramické suspenze bylo vytvoření vodné suspenze monomerů (MAM + MBAM). Hmotnostní podíl monomerů v demineralizované vodě byl 15 hm. %. Poměr jednotlivých monomerů byl 4:1 (MAM:MBAM).
2. Pro danou suspenzi bylo vypočteno množství vodného roztoku monomerů, a následně bylo nalito do baňky.
3. K takto připravenému a odměřenému množství bylo pipetou přidáno dané množství disperzantu Dolapix .
4. Připravený roztok byl následně několik minut míchán na magnetické míchačce.
5. Přesně navážené množství daného prášku bylo postupně vsypáváno do baňky. Jakmile byl vmíchán všechen prášek, byla suspenze míchána po dobu 15 minut.
6. Následně byla suspenze vložena do ultrazvuku po dobu 10 minut, kde došlo k dispergaci částic.

7. Po vyjmutí z ultrazvuku byly jednotlivé suspenze (120 ml) přelity do mlecích nádob (kyvet).

Mletí keramické suspenze

8. Do přelitých suspenzí bylo naváženo přesné množství kuliček ZrO_2 o průměru 1 mm. Množství mlecích kuliček bylo spočteno dle množství suspenze, námi vypočtený poměr byl 5g mlecích kuliček na 1 ml suspenze.
9. Takto připravené suspenze byly mlety na mlecí stolici po dobu 48 hodin, při konstantních otáčkách 50 ot/min. Průměr mlecích nádob (kyvet) byl 94 mm.

Odlévání suspenze

10. Pomletá suspenze byla slita a do získaného množství bylo přidáno přesně vypočtené množství iniciátoru APS s upravenou hodnotou pH (přibližně 8,5).
11. Následně byla suspenze důkladně míchána po dobu 2 minut.
12. Po uplynutí časového intervalu byla suspenze dávkována po přesném množství (4 ml do malých forem tj. \varnothing 30 mm a 12,5 ml do velkých forem tj. \varnothing 40 mm) injekční stříkačkou.

Gelace

13. Formy byly vloženy do exikátoru, který byl následně profukován dusíkem po dobu 7 minut, z důvodu zabránění omezení procesu gelace působením kyslíku.
14. Vzorky byly ponechány v exikátoru po dobu 2 hodin, aby došlo k úplnému zgelovatění.

Sušení

15. Tělesa byla vyjmuta z exikátoru, omyta a osušena a následně byla umístěna na sítku do sušárny. Sušení probíhalo při 20 °C a při vlhkosti 98 %. Následovalo snižování vlhkosti v sušárně až na 60 %, poté byla tělesa vyndána a dosušena na vzduchu.

Vyžihání

16. Po vysušení bylo provedeno na určitém počtu vzorků z keramického prášku ZrO_2 vyžihání na teploty 900°C a 1100°C, obě teploty s výdrží po dobu jedné hodiny. U vzorků z prášku Al_2O_3 byly vzorky vyžihány pouze na teplotu 800°C rovněž s výdrží po dobu jedné hodiny.

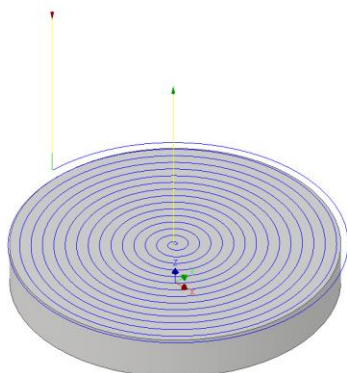
Smrštění polotovarů po odlití bylo měřeno u všech vzorků ve všech variantách. To konkrétně znamená, že pro materiál ZrO_2 byl sledován průměr v nevyžihaném stavu a ve stavech vyžihaných na 900 °C a 1100 °C. Měření probíhalo pomocí posuvného měřítka a výsledky byly zapisovány a následně z nich byl vyhodnocen průměr. Pro Al_2O_3 byl postup identický a byl měřen v nevyžihaném stavu a ve stavu vyžihaném na 800 °C.

Celkem bylo vyrobeno ze suspenze ZrO_2 57 vzorků ve tvaru disku o průměru 30 mm a tloušťce 5 mm a 21 disků o průměru 40 mm a tloušťce 10 mm. Ze suspenze Al_2O_3 bylo vyrobeno 49 disků o průměru 30 mm a tloušťce 5 mm a 20 vzorků o průměru 40 mm a tloušťce 10 mm.

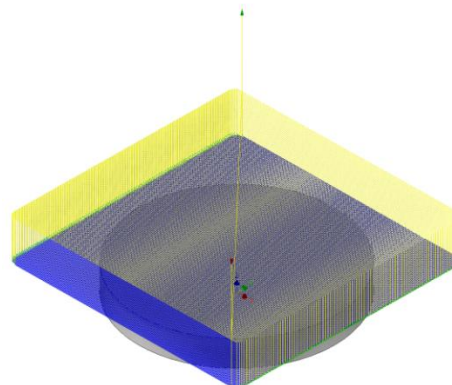
Zkušební tělesa tedy byla připravena v nevyžíhaném stavu a žíhané na 900 a 1100 °C pro materiál ZrO_2 a nevyžíhaném stavu a žíhané na 800 °C pro materiál Al_2O_3 .

4.2 Obrábění

Obrábění zkušebních těles probíhalo na CNC frézce HWT E-442 CNC TROLL (AZK, Česká republika). Pro návrh obráběcích drah a generování CNC kódu byl použit software Autodesk Inventor Professional 2018 s modulem Autodesk HSM Ultimate 2018. Pro generování CNC kódu byl použit postprocesor naprogramovaný přímo pro daný typ frézky firmou CAD Studio (Česká republika). Jako základní obráběcí strategie byla použita spirálová strategie na obr. 13 (pro obrábění ploch disků) doplněna strategií rovnoběžnou (obr. 14). Dále byly použity strategie kapsa a kontura v kombinaci se spirálovou strategií v případě složitějších tvarů. Ve všech případech obrábění byly strategie nastaveny tak, aby docházelo k souslednému frézování.



Obr. 13 Spirálová strategie f-0.1-0.4 pro obrobení plochy



Obr. 14 Rovnoběžná strategie b-0.1-0.2 pro obrobení plochy

Otáčky vřetene byly vždy 20000 ot/min. s pracovním posuvem 600 mm/min. Hloubka a šířka úběru se lišily podle použité strategie. Pro obrábění materiálu ZrO_2 nebo Al_2O_3 bylo použito několik strategií. Před označením strategie je vloženo písmeno Z nebo A, které značí materiál polotovaru. Např. při použití strategie b-0.1-0.2 pro obrábění materiálu ZrO_2 v nevyžíhaném stavu bude použito označení Z-b-0.1-0.2 green, které udává, že byla použita kulová fréza (b) s hloubkou řezu 0,1 mm a šířkou řezu 0,2 mm. Z označení A-f-0.1-1.5 vyplývá, že byl obráběn materiál Al_2O_3 s použitím ploché frézy (f) s hloubkou řezu 0,1 mm a šířkou řezu 1,5 mm. Jednotlivé strategie pro kulovou i plochou frézu jsou uvedeny v tabulce 3 a tabulce 4.

Tabulka 3 Označení a parametry strategií pro kulovou frézu

Strategie	Hloubka řezu a_p (mm)	Šířka řezu a_e (mm)	Poznámka
b-0.1-0.2	0,1	0,2	
b-0.5-0.2	0,5	0,2	
b-0.1-1.0	0,1	1,0	
b-0.5-1.0	0,1	1,0	
b-0.1+0.1-0.2	0,1+0,1	0,2	dvojitý axiální úběr
b-0.1-0.2 rovnob.	0,1	0,2	rovnoběžné obráběcí dráhy
b-0.1+0.1-0.2 rovnob.	0,1+0,1	0,2	dvojitý axiální úběr, rovnoběžné obráběcí dráhy

Tabulka 4 Označení a parametry strategií pro plochou frézu

Strategie	Hloubka řezu a_p (mm)	Šířka řezu a_e (mm)	Poznámka
f-0.1-0.4	0,1	0,4	
f-0.5-0.4	0,5	0,4	
f-0.1-1.5	0,1	1,5	
f-0.5-1.5	0,5	1,5	
f-0.1+0.1-0.4	0,1+0,1	0,4	dvojitý axiální úběr
f-0.1-0.4 rovnob.	0,1	0,4	rovnoběžné obráběcí dráhy
f-0.1+0.1-0.4 rovnob.	0,1+0,1	0,4	dvojitý axiální úběr, rovnoběžné obráběcí dráhy

Každému materiálu byly přiřazeny oba typy fréz, které obráběly jen a pouze daný materiál. Vzorky z obou materiálů byly obrobena jak kulovou frézou s označením 30 6553 0200 100 (P-Obr. 1 v příloze)(Karnasch, Německo), tak i plochou frézou s označením 30 6542 0200 120 (P-Obr. 2 v příloze) od stejného výrobce. Ve výsledku byly používány 4 frézy (Al_2O_3 – kulová, plochá, ZrO_2 – kulová, plochá).

Kulová fréza má dle schématu na P-Obr. 1, následující rozměry: $d_1 = 2$ mm, $r = 1 \pm 0,002$ mm, $l_3 = 10$ mm, $d_2 = 4$ mm, $d_3 = 1,92$ mm, $l_1 = 60$ mm, $l_2 = 3$ mm.

Rozměry pro plochou frézu jsou dle schématu na P-Obr. 2 následující: $d_1 = 2$ mm, $l_3 = 12$ mm, $d_2 = 4$ mm, $d_3 = 1,92$ mm, $l_1 = 60$ mm, $l_2 = 3$ mm.

4.2.1 Obrábění ploch pro hodnocení drsnosti

Drsnost byla hodnocena na vzorcích s obrobena plochou před slinováním a po slinování. Celkem bylo obrobena 42 vzorků vyrobených ze suspenze prášku ZrO_2 , o průměru 30 mm a tloušťce 5 mm. Vzorky vyrobené ze suspenze prášku Al_2O_3 , měly stejnou velikost jako vzorky ZrO_2 , ale bylo jich obrobena 20. Vyrobené vzorky byly obráběny v několika stavech jak je vidět v tabulce 5. Počet vzorků uvedený v tabulce 5 je odlišný, z důvodu počtu použitých strategií a stavu vzorků.

Tabulka 5 Přehled jednotlivých počtů a typů vzorků

Stav vzorků ZrO₂	nežíhané	900°C	1100°C
Počet kusů	14	14	14
Stav vzorků Al₂O₃	nežíhané	800°C	-
Počet kusů	10	10	-

Po získání připravených vzorků byl postup následující. Okraje polotovarů byly po odlití a vysušení zbroušeny na smirkovém papíru (zrnitost 400). Poté byly plochy určené k obrábění zarovnané, speciálně vyhrazenou, plochou frézou s hloubkou řezu 0.5 mm a šířkou řezu 0.8 mm pomocí spirálové strategie. Tím byl vytvořen základní - výchozí stav pro studované strategie (tabulka 3 a tabulka 4), aby bylo zajištěno, že daná strategie bude odebrat zvolený objem materiálu. Nástroj pro obrobení do výchozího stavu polotovarů byl použit pouze pro obrábění do výchozího stavu, tzn. pro studované strategie byl použit nástroj nový, jak bylo zmíněno výše.

V případě obrábění ploch, určených pro studium drsnosti obrobeného povrchu, byly polotovary nalepeny na obráběcí stůl oboustrannou adhezivní páskou tloušťky cca 0,150 mm. Toto upevnění vzorků se jevilo jako dostatečně tuhé pro většinu strategií. Plochy obrobených vzorků byly hodnoceny jak horizontální, tak i vertikální, tedy boky vzorků. Pro ty byly vybrány dvě strategie, a to Z-b-0.1-0.2 a Z-b-0.5-0.2.

4.2.2 Obrábění tvarů pro hodnocení hran a špic

Pro studium kvality a ostrosti obrobených hran a špic byl vytvořen model, na kterém bylo kulovou frézou obrobeno pět výsečí vybranými strategiemi:

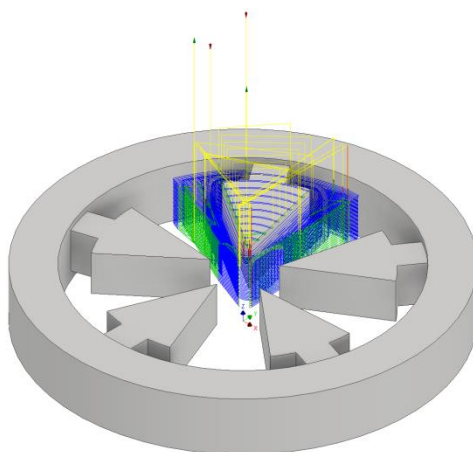
- 1) b-0.1-0.2
- 2) b-0.5-0.2
- 3) b-0.1-1.0
- 4) b-0.5-1.0
- 5) b-0.25-0.25

Strategie b-0.25-0.25 byla přidána záměrně, aby bylo možné porovnat obrábění se stejnými parametry a_e a a_p .

Výseče byly obrobeny z polotovaru o průměru 40 mm a tloušťce 10 mm. Model výseče s obráběcími drahami strategie b-0.1-1.0 je znázorněn na obr. 15. Z materiálu ZrO₂ byly obrobeny vzorky v nežíhaném stavu a vyžíhané na 900 a 1100 °C, vždy po jednom kusu. Z materiálu Al₂O₃ byl obroben vzorek v nežíhaném stavu a vyžíhaný na 800 °C.

Polotovar byl předem obroben tak, že do spodní strany disku byla vyfrézována kapsa hluboká 1 mm, aby jednotlivé výseče nebyly v kontaktu s obráběcím stolem při obrábění výsečí. Takto připravený polotovar byl upevněn adhezivní páskou k obráběcímu stolu.

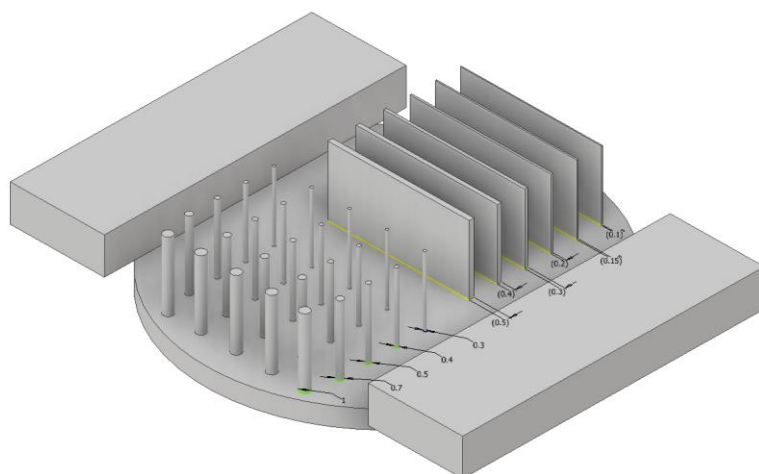
Výseče byly obrobena tak, že byl nejprve obroben meziprostor výsečí hrubováním ($a_p=0,5$ mm, $a_e=0,5$ mm) s radiálním přídávkem 0,1 mm. Poté byla hrubováním ($a_p=0,5$ mm, $a_e=0,5$ mm) obrobena každá výseč s ponecháním radiálního přídávku rovnajícímu se a_e jednotlivých strategií (např. pro strategii b-0.1-0.2 byl ponechán radiální přídavek 0,2 mm). Posledním krokem bylo finální obrobění horní plochy výseče a bočních stran. Pro hrubování a finální obrobění bočních stran byly použity strategie kapsy, horní plochy výsečí byly obrobena spirálovými strategiemi zmíněnými výše. Po obrobění byly výseče z disku odděleny pro následné sledování.



Obr. 15 Znáznornění drah pro obrobění výseče strategií b-0.1-1.0

4.2.3 Obrábění složitých tvarů a jejich tvarová stabilita

Obrábění složitých tvarů a jejich tvarová stabilita hraje významnou roli především při následných aplikacích, např. ve stomatologii apod. Proto bylo v této práci zvoleno hned několik tvarů. Jedním z nich byly krychle o délce stran 7 mm, dalšími obroběnými tvary byly piny a lamely, jejichž model je znázorněn na obr. 16. Postup pro obrobění pinů a lamel je následující. Před samotným obráběním byl nejdříve připraven polotovar. Pro dostatečně tuhé upnutí polotovaru bylo zapotřebí použít dvě boční upínky, viz obr. 16. Průměr pinů byl postupně od okraje disku snižován z nominálního průměru 1,0 mm na 0,7, 0,5, 0,4 a 0,3 mm. Pro každý průměr bylo namodelováno pět pinů. Tloušťka lamel se od kraje disku naopak zvyšovala z 0,1 mm na 0,15, 0,2, 0,3, 0,4 a 0,5 mm. Rozmístění pinů i lamel je znázorněno na obr. 16. Pro finální obrábění pinů a lamel byla zvolena strategie b-0.5-0.2 pouze pro polotovary ZrO_2 v nežíhaném a žíhaném stavu na 900 a 1100 °C.



Obr. 16 Model pinů a lamel, upnutý pomocí upínek

4.3 Metody hodnocení

4.3.1 Nasákavost těles

Stanovení hustoty těles se provádí metodou nasákavosti, která se skládá z několika kroků. Prvním z nich je *stanovení hmotnosti vysušeného vzorku* (m_1). Vzorek se vysuší pod infralampou při teplotě asi 110 °C po dobu minimálně 1 hodiny. Následně se ochladí v exikátoru a zváží na vahách.

Druhým krokem je *syčení vzorku*. Ochlazený a vysušený vzorek se vloží do vakuovatelného exikátoru a je vakuován po dobu alespoň 30 minut. Poté se čerpání zastaví a do nádoby se vzorkem je pomalu přidávána destilovaná voda, obohacená třemi kapkami smáčedla, dokud není vzorek ponořen alespoň 1 – 2 cm pod hladinou. Poté se exikátor se vzorkem znovu 30 minut vakuuje, následně zavzdušní a vzorek se nechá ponořený ještě dalších cca 30 minut.

Třetím krokem metody nasákavosti je *určení hmotnosti nasyceného vzorku váženého v kapalině* (m_2). Vodou nasycený vzorek se položí na misku vah tak, aby byl celý ponořen v již zmíněné destilované vodě obohacené o 3 kapky smáčedla. Po ustanovení rovnováhy je zapsána hmotnost vzorku a teplota kapaliny.

Čtvrtým krokem je *určení hmotnosti nasyceného vzorku váženého na vzduchu* (m_3). Po vyjmutí ponořeného vzorku z misky vah se povrch vzorku osuší vlhkým hadříkem nebo filtračním papírem tak, aby nedocházelo k odsátí nebo k vypaření vody z objemu vzorku, a zváží se na vahách. Vlivem odpařování vody se hmotnost vzorku snižuje, proto se zapisuje první naměřená hodnota.

Celý postup od bodu 1 do bodu 4 se opakuje celkem třikrát. Výpočet objemové hmotnosti vzorku se provádí podle následujících vztahů. Nejprve je určen objem otevřených pórů v tělese V_0 . Následně se vypočtena objemová hustota vzorku OH , díky níž může být

stanovena relativní hustota vzorku ρ_{rel} . Ta je vztažena vždy k teoretické hustotě ρ_{teor} daného materiálu. Teoretická hustota ρ_{teor} je pro ZrO_2 6,08 g/cm³ a pro Al_2O_3 3,99 g/cm³.

$$V_0 = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_3 - m_2)} \cdot 100 [\%], \quad (6)$$

$$OH = \frac{m_1 \cdot \rho_{H_2O}}{(m_3 - m_2)} [g \cdot cm^3], \quad (7)$$

$$\rho_{rel} = \frac{OH}{\rho_{teor}} \cdot 100 [\%], \quad (8)$$

kde
$$\rho_{H_2O} = \frac{(0,997-0,9984)}{5} \cdot (T[^\circ C] - 20) + 0,9984) \quad (9)$$

4.3.2 Kvalita obrobených povrchů keramických součástí

Kvalita povrchů se kvantitativně hodnotí pomocí profilometrie, což je metoda, při které se snímá povrch součásti na předem určené vyhodnocované délce, viz obr. 18 a obr. 19, a získává se profil povrchu – tzv. základní P-profil. Z P-profilu se následně odfiltrují profily drsnosti (R-profil) a vlnitosti (W-profil), viz obr. 17, z nichž se nejčastěji určují následující parametry ([44–47] a další):

Ra – Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu (obr. 18)

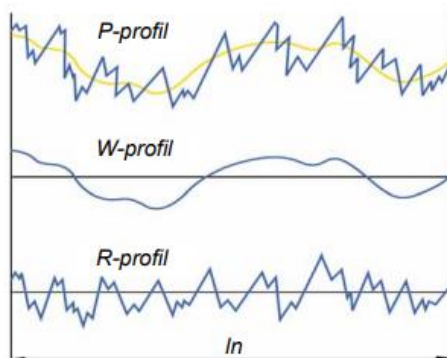
$$Ra = \frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z(x)| dx \quad (10)$$

Rz – Největší výška profilu - součet výšky nejvyššího výstupku profilu (R_p) a hloubky nejnižší prohlubně profilu (R_v) v rozsahu základní délky lr

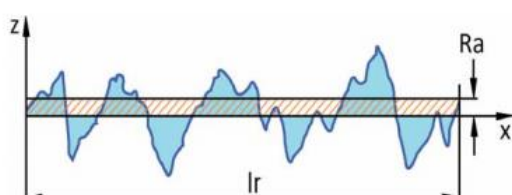
Rv – Největší hloubka prohlubně profilu - hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky

Rp – Největší výška výstupku profilu - výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky (obr. 19)

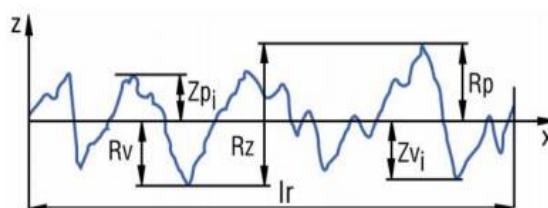
Zmíněné parametry byly stanoveny v rozsahu základní délky lr , podle které je stanovena měřená délka ln , dle předpokládané drsnosti nebo periodicity daného povrchu. Na základě zjištění byla dle normy ČSN EN ISO 4288 [46] stanovena velikost měřené délky $ln = 5lr$.



Obr. 17 Základní P-profil a z něj následně odfiltrovaný R-profil a W-profil [44]



Obr. 18 Průměrná aritmetická odchylka R_a , daného profilu [44]



Obr. 19 Parametry profilu drsnosti R_z , R_v a R_p [44]

Jak bylo uvedeno v předcházející kapitole, při hodnocení povrchu keramiky lze dosáhnout různých hodnot. Tyto hodnoty se mění vzhledem ke stavu, ve kterém byly obráběny a v neposlední řadě také k volbě nástroje použitého při obrábění.

Data získaná z profilometru DektakXT® (Bruker Corporation), byla převedena do patřičného formátu a následně vyhodnocena za pomoci softwaru Gwyddion (verze 1.49). Hrot profilometru splňoval požadavky normy ČSN ISO 4287 [44], poloměr hrotu se volil pro jednotlivá rozmezí parametru R_a .

4.3.3 Mikroskopická analýza

Obrobené vzorky výsečí byly podrobeny zkoumání pomocí skenovacího elektronového mikroskopu Verios 460L (FEI, Česká republika). S jeho pomocí byly pořízeny fotografie výsečí v několika různých zvětšeních. Pro hodnocení špic a hran byly snímky pořízené ve zvětšení 100x. Rovněž byly pořízeny snímky obrobeného povrchu jednotlivých vzorků při zvětšení 350x. Detail obrobeného povrchu byl zachycen na snímcích při zvětšení 2500x.

4.3.4 Hodnocení hran a špic

Fotografie ze SEM byly vyhodnoceny, stejně jako v předchozím případě, v softwaru Gwyddion. Jednalo se o vyhodnocení ostroty a tvarové přesnosti špic na obrobených materiálech ve stavu po obrobení a ve stavu po slinutí. Z důvodu rozsáhlé obrazové dokumentace jsou některé obrázky umístěny v příloze.

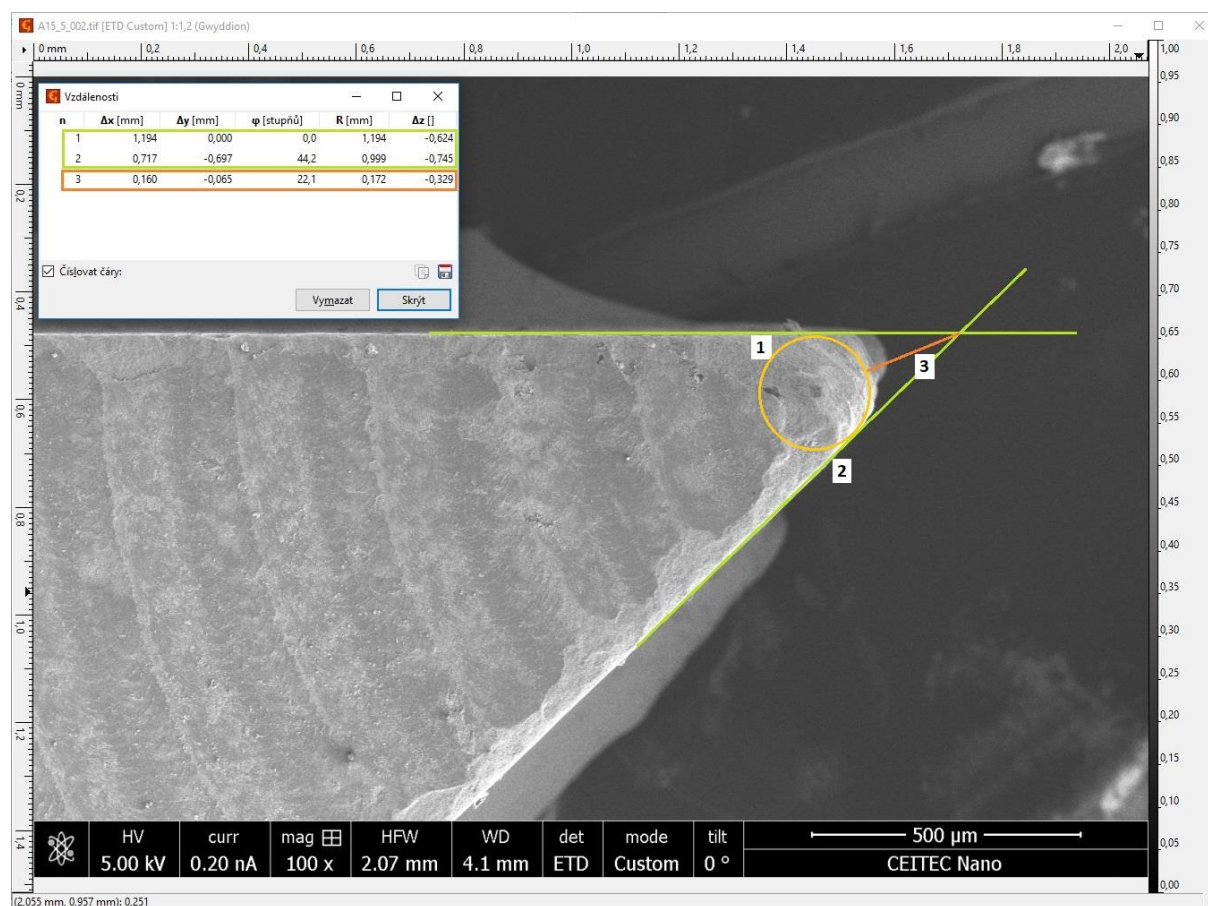
Fotografie byly vyhodnocovány pomocí geometrických funkcí. Jak je znázorněno na obr. 20, byly nejprve sestrojeny čáry 1 a 2 podél hran (zelené). Z průsečíku těchto čar byla sestrojena čára 3 (červená), vedoucí středem mezi čarami 1 a 2 k hrotu špice. Tabulka vyhodnocování obr. 20, obsahuje naměřená data. Zajímá nás především délka R [mm] u čáry 3 (červená), a úhel mezi čarami 1 a 2 sestrojenými podél hran. Úhel mezi φ [°] čarami 1 a 2 byl, vzhledem k sestrojení 3D modelu, ve všech případech stejný (40°).

Ke zjištění poloměru vepsané kružnice r_{vk} , byl použit vzorec (22), kde R je délka čáry 3 v μm a k je hodnota vypočtená dle vztahu (11).

$$k = \cos\left(90 - \frac{\varphi}{2}\right)^2 \quad (11)$$

$$r_{vk} = \frac{R \cdot (k - 1) + R \cdot (k + 1)^{0,5}}{k} [\mu\text{m}] \quad (12)$$

Získaná data byla následně zpracována dle vzorců (11) a (12). Tím se získal poloměr vepsané kružnice r_{vk} , tedy „zaoblení“ obrobené špice (obr. 20).

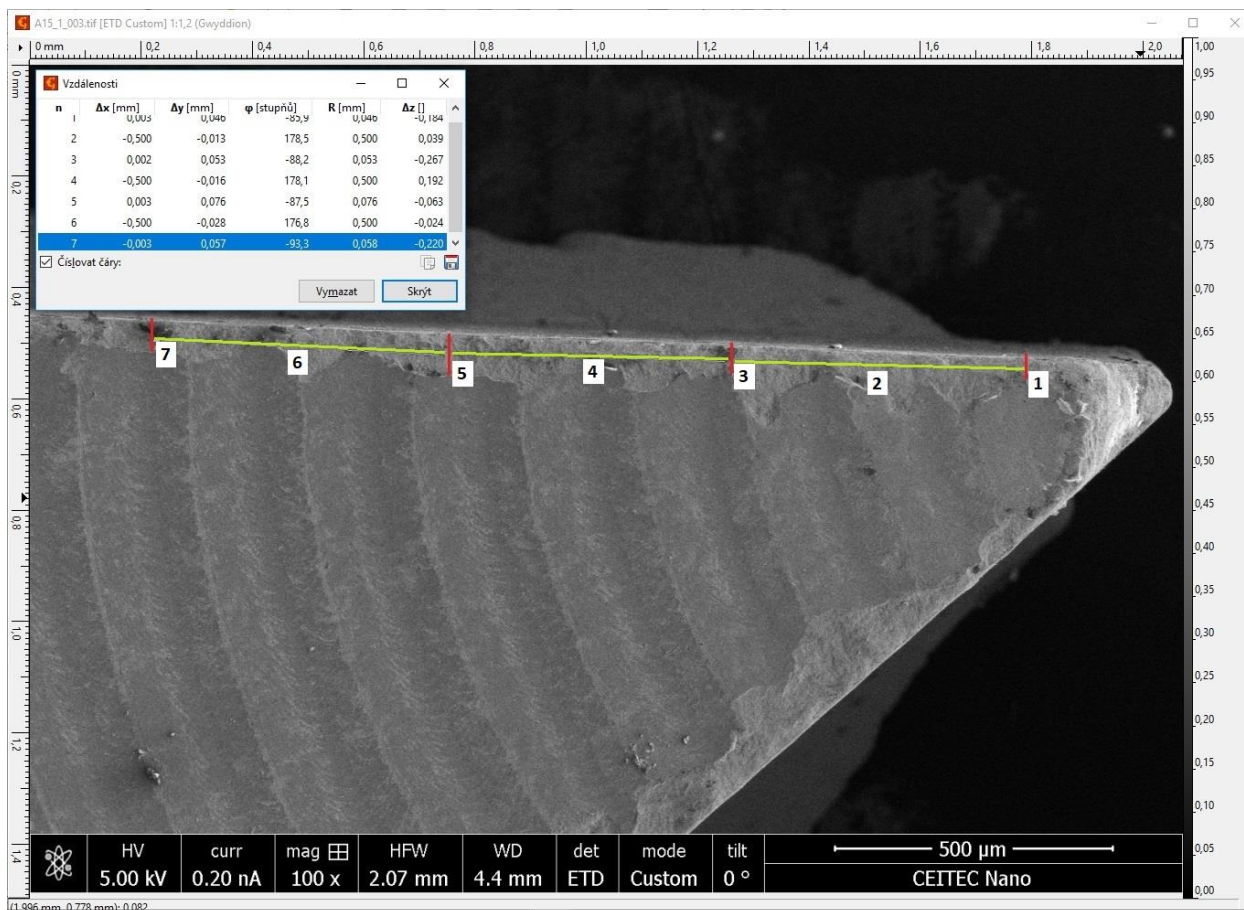


Obr. 20 Znáornění postupu vyhodnocování ostrosti špic

Pro vyhodnocení míry odlomení hran byl, stejně jako u vyhodnocení ostrosti špic, použit software Gwyddion. Na fotografiích hran pořízených, na světelném elektronovém

mikroskopu Verios 460L, byla vyhodnocována průměrná hodnota odlomení hran. Pro každou hranu bylo provedeno 6 měření míry odštípnutí po 0,5 mm, z čehož byl následně vyhodnocen průměr. Hrany byly označeny jako hrana „vjezdová“ a hrana „výjezdová“, podle trasy obráběcího nástroje.

Obr. 21 ilustruje postup při vyhodnocování hran. Poškození hran bylo měřeno pomocí červených čar (1, 3, 5 a 7), zelené čáry (2, 3 a 4) sloužily pro udržení rozestupu 0,5 mm mezi měřeními, viz obr. 21. Hodnoty délky L [mm] pro červené čáry 1, 3, 5 a 7 byly zapsány a následně byl proveden průměr hodnot.



Obr. 21 Znárodnění postupu hodnocení poškození hran

5 Výsledky a diskuse

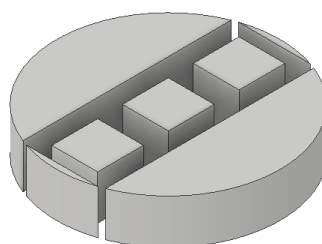
5.1 Vlastnosti polotovarů

Jak již bylo zmíněno, jednou z metod hodnocení vzorků byla nasákavost. Z dat uvedených v tabulce 6 je patrné, že se zvyšující se teplotou vyžhání se současně zvyšuje i hodnota relativní hustoty. Rovněž lze konstatovat, že relativní hustota u vzorků Al_2O_3 byla téměř o 10 % vyšší než u vzorků ZrO_2 , což následně způsobovalo spolu s tvrdostí Al_2O_3 problémy s obrobiteľností vzorků. Smrštění bylo měřeno jen u vzorků, které byly následně obráběny.

Tabulka 6 Hodnoty nasákavosti vzorků

Nasákavost a smrštění keramických polotovarů		
Vzorek	ρ_{rel} [%]	Smrštění [%]
ZrO_2 green	-	3,73
ZrO_2 800°C/0h	50,77	-
ZrO_2 900°C/1h	50,85	4,6
ZrO_2 1100°C/1h	52,83	5,71
Al_2O_3 green	-	3,8
Al_2O_3 800°C/0h	59,72	4,4
Al_2O_3 900°C/1h	59,76	-
Al_2O_3 1000°C/1h	60,47	-
Al_2O_3 1200°C/1h	66,32	-

Krychle (v tabulkách 7 a 8 označeny jako 1 a 3) byly vyfrézovány z kraje ZrO_2 disku o průměru 40 mm a tloušťce 10 mm, krychle s označením 2 byla vyfrézována ze středu téhož disku (obr. 22). Krychle byly slinuty za teploty 1450 °C po dobu 2h. Hodnota smrštění je důležitá veličina, potřebná k přesnému obrábění. Abychom byli schopni vyrobit např. zubní můstek na míru, je nutné vědět míru smrštění daného materiálu ve všech směrech pro stanovení přídavku pro obrábění.



Obr. 22 Schéma vyfrézování krychlí z polotovaru ZrO_2

Hodnoty smrštění byly měřeny ve třech směrech. Tabulka 7 uvádí průměrné hodnoty lineárního smrštění spolu s konfidenčními intervaly ($\alpha = 0,05$), pro slinuté krychle obrobené v nevyžhnaném stavu. Data ze všech směrů (X, Y a Z) se překrývají, lze tedy konstatovat, že hodnoty lineárního smrštění jsou stejné.

Hodnoty smrštění slinutých ZrO₂ krychlí obrobených ve vyžíhaném stavu na 900 °C jsou uvedeny v tabulce 8. Průměrné hodnoty smrštění jsou stejné a lze říci, že tato tělesa jsou izotropní.

Krychle obrobené ve vyžíhaném stavu na 1100 °C jsou změřeny v tabulce 9, spolu s hodnotami po slinutí. Závěr je stejný jako v předchozím případě, tedy že smrštění bylo ve všech směrech stejné a tělesa byla izotropní.

Hodnoty lineárního smrštění krychlí obrobených v nevyžíhaném stavu jsou větší než u krychlí ve stav vyžíhaném, což se shoduje s daty uvedenými v tabulce 6.

Tabulka 7 Tvarová stálost krychlí po obrobení v nevyžíhaném stavu a po slinutí

Číslo krychle	Délka hrany [mm]						Lineární smrštění [%]		
	Po obrobení			Po slinutí			X	Y	Z
	X	Y	Z	X	Y	Z			
1	7,073	7,046	6,941	5,633	5,601	5,525	20,36	20,51	20,40
2	7,039	7,047	6,946	5,594	5,609	5,527	20,53	20,41	20,43
3	7,037	7,045	6,951	5,605	5,600	5,534	20,35	20,51	20,39
Průměrné hodnoty lineárního smrštění:							20,41	20,47	20,41
Konfidenční intervaly s $\alpha = 0,05$:							$\pm 0,25$	$\pm 0,15$	$\pm 0,05$

Tabulka 8 Tvarová stálost krychlí po obrobení ve vyžíhaném stavu na 900 °C a po slinutí

Číslo krychle	Délka hrany [mm]						Lineární smrštění [%]		
	Po obrobení			Po slinutí			X	Y	Z
	X	Y	Z	X	Y	Z			
1	7,022	7,011	6,949	5,624	5,609	5,559	19,91	20,00	20,00
2	7,020	7,013	6,944	5,620	5,619	5,556	19,94	19,88	19,99
3	7,018	7,010	6,942	5,625	5,612	5,563	19,85	19,94	19,86
Průměrné hodnoty smrštění:							19,90	19,94	19,95
Konfidenční intervaly s $\alpha = 0,05$:							$\pm 0,12$	$\pm 0,15$	$\pm 0,19$

Tabulka 9 Tvarová stálost krychlí po obrobení ve vyžíhaném stavu na 1100 °C a po slinutí

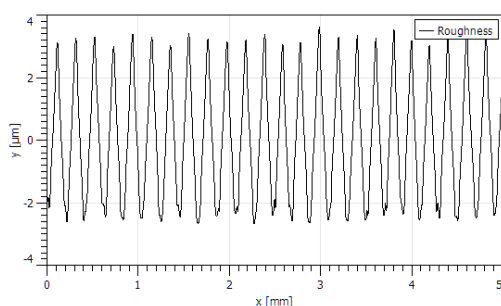
Číslo krychle	Délka hrany [mm]						Lineární smrštění [%]		
	Po obrobení			Po slinutí			X	Y	Z
	X	Y	Z	X	Y	Z			
1	7,001	7,010	7,044	5,679	5,679	5,703	18,88	18,99	19,04
2	7,001	7,013	7,022	5,679	5,688	5,685	18,88	18,89	19,04
3	7,182	7,010	7,000	5,822	5,681	5,666	18,94	18,96	19,06
Průměrné hodnoty smrštění:							18,90	18,95	19,04
Konfidenční intervaly s $\alpha = 0,05$:							$\pm 0,08$	$\pm 0,12$	$\pm 0,03$

Závěrem hodnocení vlastností polotovarů je tedy, že spolu se zvyšující se teplotou vyžíhání polotovarů roste současně i relativní hustota polotovarů. Polotovary z materiálu Al_2O_3 vykazovaly relativní hustotu až o 10 % vyšší než tomu bylo u polotovarů ZrO_2 , což souvisí s jejich následnou tvrdostí a špatnou obrobiteľností. Lineární smrštění bylo v každé variantě vzorku, u krychlí 1 až 3, stejné. Na základě těchto skutečností, lze konstatovat, že materiál byl izotropní ve všech případech a v každé části polotovaru.

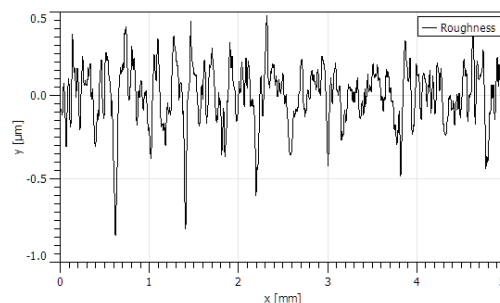
5.2 Kvalita obrobených povrchů

5.2.1 Plochy

Plochy vzorků obrobené kulovou frézou, vykazovaly po provedení profilometrie periodický profil, viz obr. 23, naproti tomu vzorky obrobené plochou frézou vykazovaly v mnoha případech neperiodicitu, viz obr. 24. Z těchto hodnot je možné udělat závěr, že periodicitu obrobeného povrchu je závislá na druhu použité frézy.



Obr. 23 Zobrazení periodicity drsnosti povrchu vzorku Z-b-0.1-0.2 ve stavu nevyžíhaném nebo vyžíhaném na 900 a 1100 °C



Obr. 24 Zobrazení neperiodicity drsnosti povrchu vzorku Z-f-0.5-0.4 ve vyžíhaném stavu na 900 °C

Data vzorků ZrO_2 získaná z měření na profilometru byla zpracována a jsou uvedena v tabulce 10. Vzorky byly obrobeny kulovou frézou a byly měřeny před a po slinutí. Po slinutí došlo téměř u všech parametrů drsnosti ke zlepšení, tj. snížení hodnot parametrů drsnosti.

Z dat vyplývá, že vzorky obrobené v nevyžíhaném stavu měly nejhorší, tj. nejvyšší parametry drsnosti. Vzorky obrobené ve stavu vyžíhaném na 900 °C vykazovaly výrazné zlepšení parametrů v porovnání se vzorky obrobenými v nevyžíhaném stavu. Vzorky vyžíhané na 900 °C vykazují celkově nejlepší, tedy nejnižší hodnoty parametrů drsnosti téměř ve všech případech. Proti tomu vzorky obrobené ve vyžíhaném stavu na 1100 °C vykazovaly hodnoty parametrů drsnosti po slinutí. Výjimkou jsou strategie Z-b-0.1-0.2 1100 a Z-b-0.1-0.2 1100 rovnob., které mají nejnižší hodnoty drsnosti u vzorků vyžíhaných na 1100 °C. Z uvedených dat byla jako nejlepší strategie pro obrábění kulovou frézou vyhodnocena strategie Z-b-0.1+0.1-0.2 900 rovnob.

V případě obrábění vzorků ZrO_2 plochou frézou a následném slinování došlo k opačnému efektu, než tomu bylo u vzorků obrobených kulovou frézou. Většina obrobených vzorků, které byly následně slinuty vykazují, na rozdíl od obrobení kulovou frézou, zhrubnutí všech parametrů drsnosti až na výjimky, viz tabulka 11.

Stejně jak tomu bylo u vzorků obrobených kulovou frézou, i zde vykazovaly celkově nejlepší hodnoty drsnosti vzorky obrobené ve stavu vyžíhaném na 900 °C. I v tomto případě došlo u vzorků obrobených ve stavu vyžíhaném na 1100 °C ke zhoršení parametrů drsnosti. Výjimkou jsou zde, stejně jako v předchozím případě dvě strategie, a to Z-f-0.5-0.4 1100 a Z-f-0.1-0.4 1100, které měly nižší drsnost po slinutí. U těchto strategií jsou ovšem rozdílné úběry do hloubky. Jako nejlepší strategie s nejnižšími hodnotami drsnosti vychází strategie Z-f-0.1+0.1-0.4, u vzorku obrobeného plochou frézou ve vyžíhaném stavu na 900 °C.

Tabulka 10 Hodnoty drsnosti ploch vzorků ZrO2 obrobených kulovou frézou ve stavu před a po slinování

Značení vzorku	Po obrobení				Po slinutí			
	Ra [μm]	Rv [μm]	Rp [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rv [μm]	Rp [μm]	Rz [μm]
Z-b-0.1-0.2 1100	1,2	2,2	3,1	5,5	0,8	1,8	2,1	4,0
Z-b-0.1-0.2 900	1,3	2,2	3,2	6,2	0,9	2,1	2,1	3,9
Z-b-0.1-0.2 green	1,6	2,7	3,6	6,9	1,7	3,0	3,2	6,3
Z-b-0.5-0.2 1100	1,3	2,4	3,3	6,2	1,0	1,9	2,6	4,8
Z-b-0.5-0.2 900	1,4	2,2	3,3	6,4	1,0	2,0	3,0	4,7
Z-b-0.5-0.2 green	1,4	2,7	3,8	7,3	1,3	3,4	3,4	6,3
Z-b-0.1+0.1- 0.2 1100	1,4	2,6	3,5	6,6	1,0	2,0	2,6	4,9
Z-b-0.1+0.1- 0.2 900	1,3	2,3	2,9	5,7	1,0	2,0	2,2	4,3
Z-b-0.1+0.1- 0.2 green	1,7	3,0	4,1	7,7	1,5	4,0	3,4	6,4
Z-b-0.1-0.2 1100 rovnob.	1,2	2,7	2,9	5,7	0,9	1,1	2,3	4,3
Z-b-0.1-0.2 900 rovnob.	1,4	2,8	3,3	6,3	1,0	2,5	2,9	4,8
Z-b-0.1-0.2 green rovnob.	1,6	2,9	2,6	6,9	1,6	3,3	3,9	6,7
Z-b-0.1+0.1- 0.2 1100 rovnob.	1,3	2,2	3,0	5,7	1,0	1,8	2,3	4,4
Z-b-0.1+0.1- 0.2 900 rovnob.	1,4	2,7	3,1	6,1	1,0	2,1	2,0	3,9
Z-b-0.1+0.1- 0.2 green rovnob.	1,8	3,4	4,2	7,6	1,6	3,8	3,1	6,1

* strategie Z-b-0.5-1.0 nebyla vyhodnocována vzhledem k výrazně vysokým hodnotám parametrů drsnosti

Tabulka 11 Hodnoty drsnosti ploch vzorků ZrO2 obroběných plochou frézou ve stavu před a po slinutí

Značení vzorku	Po obrobení				Po slinutí			
	Ra [μm]	Rv [μm]	Rp [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rv [μm]	Rp [μm]	Rz [μm]
Z-f-0.1-0.4 1100	0,2	0,5	0,7	1,2	0,4	1,3	1,0	1,9
Z-f-0.1-0.4 900	0,2	1,0	0,7	1,1	0,1	0,6	0,7	1,2
Z-f-0.1-0.4 green	0,2	0,8	1,3	2,1	0,3	0,9	2,0	2,7
Z-f-0.5-0.4 1100	0,6	1,5	1,5	2,7	0,2	0,7	0,7	1,2
Z-f-0.5-0.4 900	0,1	0,8	0,5	0,8	0,3	1,0	1,0	1,7
Z-f-0.5-0.4 green	0,3	0,7	1,3	2,3	0,4	0,9	2,1	2,5
Z-f-0.1-1.5 1100	0,3	2,1	1,2	1,9	0,3	1,2	1,4	2,2
Z-f-0.1-1.5 900	0,5	2,4	2,2	2,9	0,2	0,7	2,2	1,7
Z-f-0.1-1.5 green	0,5	1,4	2,1	3,2	0,3	0,9	1,1	1,9
Z-f-0.5-1.5 1100	0,2	1,3	1,1	1,8	0,3	1,3	1,5	2,5
Z-f-0.5-1.5 900	0,2	1,7	0,7	1,3	0,2	0,6	0,8	1,3
Z-f-0.5-1.5 green	0,3	0,9	1,3	2,2	0,4	1,0	1,7	2,8
Z-f-0.1+0.1-0.4 1100	0,2	0,7	0,7	1,2	0,1	0,9	0,6	0,9
Z-f-0.1+0.1-0.4 900	0,2	0,7	0,7	1,1	0,1	0,7	0,5	1,0
Z-f-0.1+0.1-0.4 green	0,3	0,7	1,2	2,1	0,3	0,9	1,1	1,6
Z-f-0.1-0.4 1100 rovnob.	0,2	1,6	0,7	1,2	0,2	1,2	0,6	1,0
Z-f-0.1-0.4 900 rovnob.	0,2	0,9	0,7	1,1	0,2	2,3	0,8	1,2
Z-f-0.1-0.4 green rovnob.	0,1	0,3	0,3	0,6	0,2	0,6	0,7	1,3
Z-f-0.1+0.1-0.4 1100 rovnob.	0,1	3,1	0,4	0,7	0,2	1,9	0,7	1,1
Z-f-0.1+0.1-0.4 900 rovnob.	0,1	1,2	0,5	0,9	0,1	0,6	1,1	0,9
Z-f-0.1+0.1-0.4 green rovnob.	0,1	0,2	0,3	0,6	0,3	1,4	1,1	1,9

Vzhledem k výše zmíněných výsledkům lze konstatovat, že drsnost povrchu je ovlivňována především použitou strategií a rovněž stavem polotovaru. U vzorků obrobených kulovou frézou došlo po slinutí těles ke snížení parametrů drsnosti. Pro vzorky obrobené plochou frézou došlo po slinutí k opačnému efektu, tedy ke zvýšení parametrů drsnosti. Celkově ale dosáhly lepších parametrů drsnosti než je tomu u vzorků obrobených kulovou frézou.

Pro vzorky ZrO₂ obrobené kulovou frézou byla jako nejlepší strategie s nejnižšími parametry drsnosti vyhodnocena strategie Z-b-0.1+0.1-0.2 rovnob. a to pro vzorky obrobené ve stavu vyžíhaném na 900 °C. Strategie s nejlepšími parametry drsnosti u vzorků ZrO₂ obrobených plochou frézou byla vyhodnocena strategie Z-f-0.1+0.1-0.4 rovněž na vzorcích obrobených ve stavu vyžíhaném na 900 °C.

Celkově lze konstatovat, že nejvhodnější strategií pro obrábění vzorků ze ZrO₂ je strategie s dvojitým úběrem do hloubky (0,1 mm) a s jedním bočním úběrem 0,2 mm pro kulovou frézu a 0,4 mm pro plochou frézu. Stejně tak můžeme říci, že nejlepšími hodnotami parametrů drsnosti bylo dosaženo na vzorcích obrobených ve stavu vyžíhaném na 900 °C. Dosažené hodnoty drsnosti Ra u vzorku ZrO₂ obrobeném kulovou frézou byly Ra = 1 μm a u vzorku ZrO₂ obrobeného plochou frézou byly naměřeny hodnoty drsnosti Ra = 0,1 μm. Obě strategie spolu s parametry drsnosti jsou v tabulkách vyznačeny zeleně (tabulka 10, tabulka 11).

Tabulka 12 Hodnoty drsností povrchů vzorků Al₂O₃ po obrobení kulovou frézou

Značení vzorku	Po obrobení			
	Ra [μm]	Rv [μm]	Rp [μm]	Rz [μm]
A-b-0.1+0.1-0.2 green	1,8	7,2	2,9	3,7
A-b-0.1+0.1-0.2 green rovnob.	1,9	7,6	3,2	4,0
A-b-0.1+0.1-0.2 800 rovnob.	2,2	9,0	4,1	4,9
A-b-0.1+0.1-0.2 800	2,0	8,6	3,0	4,4
A-b-0.1-0.2 800	1,4	7,0	3,7	3,7
A-b-0.1-0.2 green	1,3	6,0	2,1	3,3
A-b-0.5-0.2 800	1,7	7,6	2,9	4,0
A-b-0.5-0.2 green	1,4	6,3	7,4	3,4
A-b-0.1-0.2 800 rovnob.	1,9	8,3	3,1	4,6
A-b-0.1-0.2 green rovnob.	1,8	7,5	3,1	3,9

Tabulka 13 Hodnoty drsností povrchů vzorků Al₂O₃ po obrobení plochou frézou

Značení vzorku	Po obrobení			
	Ra [μm]	Rv [μm]	Rp [μm]	Rz [μm]
A-f-0.1+0.1- 0.4 green rovnob.	0,2	2,3	0,6	1,6
A-f-0.1+0.1- 0.4 800	0,1	0,9	2,0	0,6
A-f-0.1+0.1- 0.4 800 rovnob.	0,2	1,5	3,7	1,0
A-f-0.1-0.4 green	0,1	0,7	0,6	0,5
A-f-0.1-0.4 green rovnob.	0,2	2,1	0,7	1,9
A-f-0.1-0.4 800	0,1	0,9	1,0	0,7
A-f-0.1-0.4 800 rovnob.	0,2	1,2	5,1	0,7
A-f-0.1-1.5 800	0,1	0,9	1,5	0,5
A-f-0.5-0.4 green	0,6	2,9	1,3	1,6
A-f-0.5-0.4 800	0,3	1,7	2,0	1,0
A-f-0.5-1.5 green	0,1	1,4	0,4	1,3

Měření drsnosti vzorků Al₂O₃ proběhlo pouze ve stavu po obrobení. Důvod byl ten, že po slinutí vzorků došlo k jejich značnému deformování, což znemožňovalo jejich další měření. Z dat naměřených na vzorcích Al₂O₃ obrobených kulovou frézou (tabulka 12) je jasně vidět, že strategie s nejlepšími parametry drsnosti Ra = 1,3 μm je strategie A-b-0.1-0.2 green. Parametry byly naměřeny na vzorku obrobeném danou strategií v nevyžíhaném stavu.

Vzorky Al₂O₃ byly rovněž obrobeny plochou frézou a studovány pomocí profilometru. Z naměřených dat (tabulka 13) vyplývá, že nejlepší strategií při obrábění plochou frézou je strategie A-f-0.1-0.4 green hodnotou drsnosti Ra = 0,1 μm. Jak napovídá název strategie, hodnoty drsností byly naměřeny na vzorku obrobeném v nevyžíhaném stavu.

Závěrem lze ke vzorkům Al₂O₃ říci, že co se týče hodnot drsnosti po obrobení, nejlepších hodnot bylo dosaženo strategií A-b-0.1-0.2 po obrobení kulovou frézou, a strategií A-f-0.1-0.4 po obrobení plochou frézou u vzorků obrobených v nevyžíhaném stavu. Dalším důležitým závěrem je deformace vzorků po slinutí.

Součástí hodnocení ploch u ZrO₂ polotovarů je struktura obrobeného povrchu, který se lišil podle úpravy polotovarů (nevyžíhaný stav, vyžíhaný stav).

Všechny obrobené vzorky ZrO_2 v nevyžíhaném stavu vykazovaly na povrchu výrazné stopy po působení obráběcího nástroje. Patrná je také jeho dráha pohybu, jak je viditelné na P-Obr. 3 v příloze. Po slinování se staly stopy po nástroji mnohem zřetelnější, a to v podobě drobných obloučků ve středu dráhy nástroje, jak je vidět na P-Obr. 4. Rovněž byly při větším zvětšení pozorovány trhliny na površích všech vzorků ZrO_2 obrobených v nevyžíhaném stavu. Jak je vidět na P-Obr. 5, trhliny se tvořily kolmo na směr obrábění. Tyto trhliny mohly být příčinou horších parametrů drsnosti u vzorků obrobených v nevyžíhaném stavu. Po slinování bylo u všech vzorků obrobených v nevyžíhaném stavu pozorováno „uzdravení“ těchto trhlín, viz P-Obr. 6. Naproti tomu u vzorků Al_2O_3 nebyly trhliny po obrábění v nevyžíhaném stavu pozorovány.

Vzorky obrobené ve vyžíhaném stavu na $900\text{ }^\circ\text{C}$ vykazovaly oproti předchozím vzorkům obrobeným v nevyžíhaném stavu výrazně menší stopy po obráběcím nástroji. P-Obr. 7 znázorňuje povrch vzorku ZrO_2 obrobeného ve stavu vyžíhaném na $900\text{ }^\circ\text{C}$. Lze na něm pozorovat dráhu nástroje, nicméně charakteristické „obloučky“ po obrábění zde viditelné nejsou. Po slinutí vzorku je patrná dráha nástroje. Povrch rovněž vykazuje známky po stopách nástroje, ovšem jen velmi slabé (P-Obr. 8). Na rozdíl od vzorků obráběných v neslinutém stavu zde nejsou pozorovány žádné trhliny po obrábění, jak je vidět na P-Obr. 9. Po slinutí se stal povrch mnohem homogennější a jednotvárnější, viz P-Obr. 10.

Další typ vzorků byl vyžíhán na teplotu $1100\text{ }^\circ\text{C}$. Jak lze pozorovat na P-Obr. 11 jejich povrch vykazoval výrazně zřetelnější známky po působení obráběcího nástroje, než tomu bylo v přechodném případě. Při srovnání neslinutého a slinutého povrchu, je na povrchu po slinutí vzorku vidět zvýraznění stop po obráběcím nástroji (P-Obr. 12). Stejně jako v případě vzorků vyžíhaných na $900\text{ }^\circ\text{C}$, nevykazovaly ani tyto vzorky žádné trhliny na povrchu obrobeného tělesa (P-Obr. 13). Došlo pouze ke zhutnění a zhomogenizování částic prášku (P-Obr. 14).

Jak už bylo zmíněno, vzorky Al_2O_3 obrobené v nevyžíhaném stavu nevykazovaly na povrchu žádné trhliny. Byly ovšem pozorovány stopy po obráběcím nástroji a jeho dráha (P-Obr. 15). Stejně jako u vzorků ZrO_2 došlo po slinutí ke zvýraznění těchto „obloučků“ vzniklých od působení nástroje, viz P-Obr. 16. Důsledkem slinování byla i homogenizace a ucelení povrchu vzorku, viz P-Obr. 17 a P-Obr. 18.

Vzorky Al_2O_3 vyžíhané na $800\text{ }^\circ\text{C}$ nevykazovaly rovněž žádné trhliny na povrchu. Na rozdíl od vzorků ZrO_2 nebyly na povrchu vzorku zpozorovány dráhy a stopy po obráběcím nástroji, a to ani po slinutí, viz P-Obr. 19 a P-Obr. 20. Stejně jako v předchozím případě došlo k ucelení a homogenizaci povrchu, viz P-Obr. 21 a P-Obr. 22.

Z výše uvedeného lze konstatovat, že k tvorbě trhlín při obrábění docházelo pouze v případě vzorků ZrO_2 obráběných v nevyžíhaném stavu. Další dva případy nevykazovaly žádnou přítomnost trhlín. Ve všech třech případech bylo po slinování pozorováno zvýraznění stop po nástroji. Tak tomu bylo i u vzorků Al_2O_3 , ale jen u vzorku obrobených

v nevyžíhaném stavu. U vzorků Al_2O_3 obroběných ve stavu vyžíhaném na $800\text{ }^\circ\text{C}$ nebyly pozorovány žádné stopy po nástroji, a to ani po slinování.

5.2.2 Boční stěny

Dalším z hodnocených hledisek byly parametry drsnosti bočních stěn. Byly zde použity dvě strategie a tělesa ZrO_2 ve střežích stavech: nevyžíhaném, vyžíhaném na $900\text{ }^\circ\text{C}$ a $1100\text{ }^\circ\text{C}$. Naměřené parametry drsnosti získané obrobením vzorků kulovou frézou jsou uvedeny v tabulce 14. Strategie, vyznačená v tabulce zeleně, byla vyhodnocena jako nejlepší podle hodnot parametrů drsnosti. Jde o strategii Z-b-0.1-0.2 900, kterou byl obroběn vzorek vyžíhaný na $900\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabulka 14 Hodnoty drsnosti bočních stěn vzorků ZrO_2 obroběných kulovou frézou ve stavu před a po slinování

Značení vzorku	Po obrobení				Po slinutí			
	Ra [μm]	Rv [μm]	Rp [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rv [μm]	Rp [μm]	Rz [μm]
Z-b-0.1-0.2 green	1,0	3,1	3,8	6,2	0,9	2,9	3,3	5,1
Z-b-0.1-0.2 900	0,5	2,9	1,8	2,9	0,4	3,4	2,2	2,8
Z-b-0.1-0.2 1100	1,1	5,7	4,1	6,7	0,8	3,9	2,6	4,6
Z-b-0.5-0.2 green	1,4	3,0	4,2	6,9	0,9	3,4	3,5	5,5
Z-b-0.5-0.2 900	1,9	5,2	5,6	10,7	1,4	3,5	3,6	6,7
Z-b-0.5-0.2 1100	1,3	5,1	5,7	8,1	1,1	6,4	4,9	7,0

Z výše uvedeného plyne závěr, že nejlepšími hodnotami bylo dosaženo pomocí strategie s hloubkovým úběrem $0,1\text{ mm}$ a bočním úběrem $0,2\text{ mm}$, na vzorku ZrO_2 vyžíhaném na $900\text{ }^\circ\text{C}$. Naměřený parametr drsnosti Ra na daném vzorku byl roven $0,4\text{ }\mu\text{m}$.

5.3 Hrany a špice

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2.2, pro studium kvality a ostrosti obrobených hran byl vytvořen model, na kterém bylo kulovou frézou obrobeno pět výsečí vybranými strategiemi. Obrobeny byly pouze vzorky ZrO₂. Hodnoty získané po vyhodnocení jsou uvedeny v tabulce 15, kde označení:

r = průměr vepsané kružnice špice

H_{Vj} = průměr odštípání vjezdové hrany

H_{Vy} = průměr odštípání výjezdové hrany

H_{Vjmax} = hodnota největšího odštípnutí vjezdové hrany

H_{Vymax} = hodnota největšího odštípnutí výjezdové hrany

Ostrost špic a průměry odštípnutí obrobených hran jsou uvedeny v tabulce 15.

Podle dat v tabulce lze uvést, že nejmenší poloměr obrobené špice (tudíž nejostřejší špice) byl naměřen na vzorku obrobeném ve stavu vyžíhaném na 1100°C. Vzorek byl obrobený strategií b-0.1-1.0 (P-Obr. 23). Naopak nejhorší (největší) poloměr byl dosažen na vzorku obrobeném v nevyžíhaném stavu, který byl obrobený stejnou strategií (P-Obr. 24). Nejlepší hodnoty hran byly pozorovány rovnou na dvou vzorcích, a to na vzorku vyžíhaném na 900°C a obrobeném strategií b-0.25-0.25 (P-Obr. 25), a na vzorku vyžíhaném na 1100°C obrobeným strategií b-0.1-1.0. Nejhorší kvalita hran byla pozorována na vzorku obrobeném v nevyžíhaném stavu pomocí strategie b-0.5-0.2 (P-Obr. 26).

Závěrem lze říci, že pro dosažení nejlepší ostrosti špic a zároveň kvality hran bez odštípání je nejlepší použití strategie b-0.1-1.0 (tj. strategie s hloubkovým úběrem 0,1 mm a bočním úběrem 1 mm) pro vzorky obrobené ve stavu vyžíhaném na 1100 °C. Daná strategie je v tabulce 14 zvýrazněna zeleně. Nejhorších hodnot bylo dosaženo u vzorků obrobených v nevyžíhaném stavu. Současně lze říci, že se zvyšující se teplotou vyžíhání roste kvalita špic a hran u obrobených polotovarů.

Tabulka 15 Hodnoty ostrosti špic, průměrného odštípání hran a hodnoty největšího odštípnutí u vzorků ZrO₂ obroběných kulovou frézou

Strategie obrábění	Po obrobení					Po slinutí				
	r _{vk} [μm]	H _{Vj} [μm]	H _{Vy} [μm]	H _{Vjmax} [μm]	H _{Vymax} [μm]	r _{vk} [μm]	H _{Vj} [μm]	H _{Vy} [μm]	H _{Vjmax} [μm]	H _{Vymax} [μm]
v nevyžíhaném stavu										
b-0.1-0.2	141	60	69	149	151	129	52	45	85	116
b-0.5-0.2	196	53	63	116	159	161	45	57	86	160
b-0.1-1.0	290	54	68	117	107	249	21	37	68	81
b-0.5-1.0	178	70	48	299	129	133	48	24	242	66
b-0.25-0.25	287	53	56	115	128	199	39	51	68	88
ve vyžíhaném stavu na 900°C										
b-0.1-0.2	57	0	0	183	228	71	27	0	184	42
b-0.5-0.2	167	0	0	185	0	149	39	46	80	147
b-0.1-1.0	564	0	0	0	0	482	0	105	0	199
b-0.5-1.0	93	0	13	70	72	141	10	15	64	66
b-0.25-0.25	137	0	0	0	0	116	0	0	0	0
ve vyžíhaném stavu na 1100°C										
b-0.1-0.2	64	14	0	18	51	66	0	0	0	41
b-0.5-0.2	183	0	9	13	112	160	73	5	198	100
b-0.1-1.0	78	0	0	0	0	55	0	0	0	0
b-0.5-1.0	83	0	0	0	0	89	0	4	49	50
b-0.25-0.25	74	0	0	150	65	73	0	0	120	33

5.4 Složitě tvary

Hodnocení obrábění složitých tvarů spočívalo v počtu nepoškozených prvků. Rozměry a počty nepoškozených pinů a lamel jsou zaznamenány v tabulce 16 a tabulce 17. Je zřejmé, že piny s průměrem 0,3 mm nebyly obroběny žádné. Pravděpodobně to bylo způsobeno odjezdem nástroje od pinu, kdy mohlo dojít k nepatrnému kontaktu nástroje a pinu. Nejvíce nepoškozených pinů bylo u vzorku vyžíhaného na 900 °C. Piny se po slinutí nijak nedeformovaly (kromě smršnění), jejich geometrie zůstala zachována. Daná data jsou v tabulce zvýrazněna zeleně.

Tabulka 16 Míra přežití vyfrézovaných pinů ze vzorků ZrO₂, vždy (x z 5)

Značení vzorku	Po obrobení					Po slinutí				
	Průměr obráběných pinů [mm]					Průměr obráběných pinů [mm]				
	1,0	0,7	0,5	0,4	0,3	1,0	0,7	0,5	0,4	0,3
nevyžíhaný	5	5	0	0	0	5	5	0	0	0
vyžíhaný na 900°C	5	5	5	5	0	5	5	5	5	0
vyžíhaný na 1100°C	5	5	5	2	0	5	5	5	2	0

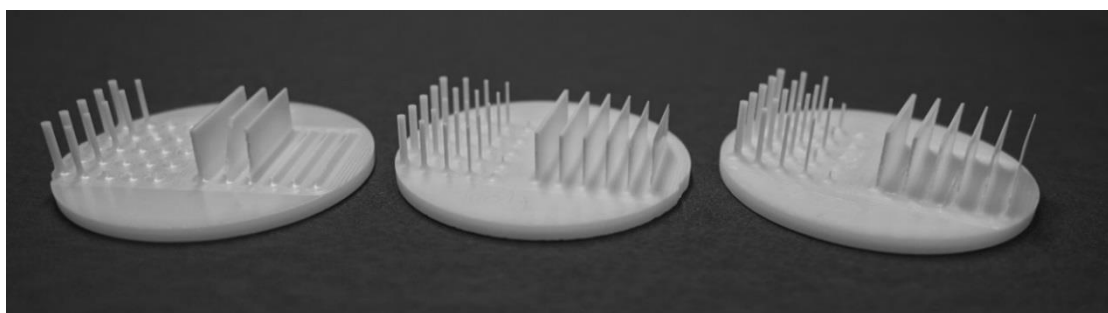
Míra přežití lamel byla podstatně lepší (tabula 17). Při obrábění vzorků v nevyžíhaném stavu se podařilo obrobít jen 3 nejsilnější lamely, navíc u nich bylo pozorováno značné

poškození krajních hran. U vzorků obrobených ve stavu vyžíhaném na 900 a 1100 °C zůstalo všech 5 lamel. U nejtenčích lamel (nominální tloušťka 0,1 mm) bylo pozorováno jemné odštípnutí krajních hran. Zbývající lamely byly již zcela bezdefektní, to jak po obrobení, tak i po slinování. Slinuté piny a lamely lze pozorovat na obr. 25.

Tabulka 17 Míra přežití vyfrézovaných lamel ze vzorků ZrO₂, vždy (x z 1)

Značení vzorku	Po obrobení						Po slinutí					
	Tloušťka obráběných lamel [mm]						Tloušťka obráběných lamel [mm]					
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1
nevyžíhaný	1	1 (lom)	1 (lom)	0	0	0	1	1 (lom)	1 (lom)	0	0	0
vyžíhaný na 900°C	1	1	1	1	1	1 (lom)	1	1	1	1	1	1 (lom)
vyžíhaný na 1100°C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Závěrem lze konstatovat, že pro obrobení složitých a jemných tvarů je nejlepší použít vyžíhané polotovary. Z takových lze vyrobít nejtenčí lamely o tloušťce přibližně 80 μm a piny s průměrem přibližně 320 μm.



Obr. 25 Slinuté piny a lamely ZrO₂ disků obrobených ve stavu (zleva): nevyžíhaném a vyžíhaném na 900 a 1100 °C

5.5 Opotřebení nástroje

Opotřebení nástroje je dalším z ukazatelů obrobiteľnosti materiálu. Stav obou druhů fréz byl porovnán jak po obrobení vzorků z materiálu ZrO₂, tak i po obrobení vzorků z materiálu Al₂O₃. Kvůli rozsáhlé obrazové dokumentaci jsou fotografie umístěny v příloze.

Na P-Obr. 27 je na fotografii ze SEM vidět ostří nového nástroje, jedná se o kulovou frézu Karnasch popsanou dříve. Na další fotografii (P-Obr. 28) je vidět tatáž fréza po obrobení 21 ks disků z materiálu ZrO₂. Disky byly obrobeny jak ve stavu nevyžíhaném, tak i vyžíhaném na 900 a 1100 °C. Na fréze nebyly pozorovány žádné vady povlaku ani jeho otěr. Snímek té samé frézy po obrobení 14 ks disků Al₂O₃ je na (P-Obr. 29). Disky byly obrobeny ve stavu nevyžíhaném a vyžíhaném na 800 °C. Stejně tomu je u frézy obrábějící disků z materiálu ZrO₂, ani zde nejsou pozorovány žádné vady ani otěr povlaku nástroje.

Druhou hodnocenou frézou je plochá fréza Karnasch 30 6553 0200 100. Stejně jako u kulové frézy byl nejdříve pořízen snímek nového nástroje, viz P-Obr. 30. Na dalším snímku (P-Obr. 31) je patrné poškození povlaku nástroje odlomením povlaku. K tomuto poškození došlo po obrobení 21 ks disků ZrO_2 jak ve stavu nevyžíhaném tak i ve stavu vyžíhaném na 900 a 1100 °C. Stejně tomu bylo i v případě obrobení 14 ks disků Al_2O_3 , kde došlo ke stejnému poškození, jak je vidět na P-Obr. 32. I zde byly vzorky obrobena jak ve stavu nevyžíhaném tak i ve stavu vyžíhaném, pouze na 800 °C.

Prvotní myšlenkou bylo obrábět disky Al_2O_3 i ve stavu vyžíhaném na 1000 – 1200 °C, nicméně po obrobení prvního takového disku došlo k výraznému poškození obráběcího nástroje (P-Obr. 33). To byl takové důvod k obrábění vzorků Al_2O_3 pouze ve stavu vyžíhaném na 800 °C.

Závěrem lze uvést, že plochá fréza je mnohem náchylnější na poškození povlaku, než fréza kulová. Toto poškození bude pravděpodobně důsledkem odebrání materiálu právě onou ostrou hranou, která je nejvíce namáhaná. K přibližně stejnému opotřebení nástroje došlo u ZrO_2 vzorků po obrobení 21 kusů, zatímco u Al_2O_3 vzorků nastalo srovnatelné opotřebení již po 14 obroběných kusech. Zároveň můžeme říci, že materiál Al_2O_3 vyžíhaný na 1000 °C je nevhodný pro obrábění.

6 Závěr

Vzhledem k výsledkům, kterých bylo dosaženo a které jsou výše popsány, můžeme konstatovat, že spolu se zvyšující se teplotou vyžíhání polotovarů roste současně i relativní hustota polotovarů. U polotovarů z materiálu Al_2O_3 byla relativní hustota výrazně vyšší (59 – 66 %) než u polotovarů ZrO_2 (50 – 52 %). To má za následek vyšší tvrdost vzorků Al_2O_3 a s tím související jejich špatnou obrobitelnost. Dalším ze závěrů je zjištění izotropního smrštění po slinování ve všech variantách vzorku ZrO_2 tj. v nevyžíhaném stavu, vyžíhaném stavu na 900 i 1100 °C. Izotropnost smrštění byla zjištěna v celém objemu polotovarů.

Drsnost obrobených ploch vzorků ZrO_2 byla nejlepší při použití strategie s dvojitým úběrem do hloubky (0,1 mm) a s jednoduchým bočním úběrem 0,2 mm u kulové frézy ($R_a = 1,0 \mu\text{m}$) a 0,4 mm u ploché frézy ($R_a = 0,1 \mu\text{m}$). To platí současně jak pro použití kulové, tak i ploché frézy. Nejlepších hodnot bylo dosaženo na vzorcích ZrO_2 vyžíhaných na 900 °C.

Vzorky Al_2O_3 byly hodnoceny jen ve stavu po obrábění. Kvůli značné deformaci vzniklé při slinování, nebylo možné další měření. Pro vzorky Al_2O_3 byla při použití kulové frézy vyhodnocena nejlepší strategie s hloubkovým úběrem o velikosti 0,1 mm a bočním úběrem 0,2 mm. Po obrobení plochou frézou vykazoval povrch nejlepší parametry drsnosti u strategie s úběrem do hloubky 0,1 mm a s bočním úběrem 0,4 mm. Nejlepších parametrů drsnosti bylo dosaženo na vzorcích Al_2O_3 v nevyžíhaném stavu. Při bližším pozorování povrchu po obrábění vzorků ZrO_2 v nevyžíhaném stavu byly zpozorovány trhliny, které se nevyskytovaly u ostatních stavů a to ani v případě Al_2O_3 vzorků. Po slinování vzorků ZrO_2 došlo ke zvýraznění stop a dráhy obráběcího nástroje. Rovněž došlo k „uzdravení“ trhlín a k homogenizaci povrchu. Tak tomu bylo i u vzorků Al_2O_3 v nevyžíhaném stavu. U vzorků Al_2O_3 obrobených ve stavu vyžíhaném na 800 °C nebyly pozorovány žádné stopy po nástroji a to ani po slinování.

Nejnižších parametrů drsnosti bočních stěn vzorku ZrO_2 bylo dosaženo použitím strategie pro kulovou frézu s hloubkovým úběrem 0,1 mm a bočním úběrem 0,2 mm. Stejně jako v případě měření parametrů drsnosti povrchu vzorků ZrO_2 , i v tomto případě byly vzorky s nejnižšími parametry drsnosti $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, vyžíhané na 900 °C.

Nejlepší ostrost špic a zároveň kvalita hran bez odštípání u ZrO_2 , byla dosažena za použití kulové frézy a strategie s hloubkovým úběrem 0,1 mm a bočním úběrem 1 mm, pro vzorky obrobené ve stavu vyžíhaném na 1100 °C. Nejhorších hodnot bylo dosaženo u vzorků obrobených v nevyžíhaném stavu. Současně lze říci, že s rostoucí teplotou vyžíhání vzorků roste zároveň i kvalita obrobených špic a hran. Z polotovarů vyžíhaných na 900 – 1100 °C lze vyrobit lamely o tloušťce až 80 μm a piny s průměrem 320 μm .

Sledováním opotřebení obráběcích nástrojů bylo zjištěno, že plochá fréza je mnohem náchylnější na poškození povlaku, než fréza kulová. Zároveň můžeme říci, že materiál Al_2O_3 vyžíhaný na teploty nad 1000 °C je nevhodný pro obrábění.

7 Literatura

- [1] CARTER, C Barry. *Ceramic materials : science and engineering*. 2nd ed. New York: New York : Springer, 2013.
- [2] GILISSEN, R U, J P ERAUW, A SMOLDERS, E VANSWIJGENHOVEN a J LUYTEN. Gelcasting, a near net shape technique. *Materials & Design*. 2000, 251–257.
- [3] VANDEPERRE, L J, A M De WILDE a J LUYTEN. Gelatin gelcasting of ceramic components. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, 135, 312–316.
- [4] YANG, Jinlong, Juanli YU a Yong HUANG. Recent developments in gelcasting of ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2011, 31(14), 2569–2591.
- [5] LIU, H, Y HUO, C WANG, J TANG, H WANG a Y CHEN. Machining behavior of green RBSC body prepared by gel-casting. *Key Engineering Materials*. 2010, 434-435, 853-855
- [6] MENČÍK, Jaroslav. *Pevnost a lom skla a keramiky*. Vyd. 1. Praha: Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00205-2.
- [7] MYERS, Peter. Narottam P. Bansal and Jacques Lamon (Eds): Ceramic Matrix Composites Materials, Modeling and Technology. *Chromatographia*. 2015, 78(11–12), 843–844
- [8] DONG, Manjiang, Xiaojian MAO, Zhaoquan ZHANG a Qian LIU. Gelcasting of SiC using epoxy resin as gel former. *Ceramics International*. 2009, 35, 1363–1366.
- [9] HA, Jung-soo. Effect of atmosphere type on gelcasting behavior of Al₂O₃ and evaluation of green strength. *Ceramics International*. 2000, 26, 251–254.
- [10] JANNEY, Mark A, Ogbemi O OMATETE, Claudia A WALLS, Stephen D NUNN a Randy J OGLE. Development of Low-Toxicity Gelcasting Systems. *Journal of the American Ceramic Society*. 1998, 91(70).
- [11] GUO, Xu. Diploma work No. 75/2011. Gel casting of high strength ceramics. *Chalmers University of Technology*. 2011, (75).
- [12] OMATETE, Ogbemi, Mark A JANNEY a Stephen D NUNN. Gelcasting: From Laboratory Development Toward Industrial Production. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008, 17, 2219(96), 407-413.
- [13] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2005.
- [14] CHELULE, K L, T J COOLE a D G CHESHIRE. An investigation into the machinability of hydroxyapatite for bone restoration implants. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, 135, 242–246.
- [15] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2009.

- [16] FILSER, F, P KOCHER, F WEIBEL, H LUTHY, P SCHARER a L J GAUCKLER. Reliability and strength of all-ceramic dental restorations fabricated by direct ceramic machining (DCM). *Int J Comput Dent*. 2001/11/08. 2001, 4, 89–106.
- [17] MOHANTY, Saralashrita, Arun Prabhu RAMESHBABU a Santanu DHARA. Net shape forming of green alumina via CNC machining using diamond embedded tool. *Ceramics International*. 2013, 39, 8985–8993.
- [18] ZUCUNI, C P, L F GUILARDI, S FRAGA, L G MAY, G K R PEREIRA a L F VALANDRO. CAD/CAM machining Vs pre-sintering in-lab fabrication techniques of Y-TZP ceramic specimens: Effects on their mechanical fatigue behavior. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2017, 71, 201–208.
- [19] WANG, Hang, Moustafa N ABOUSHELIB a Albert J FEILZER. Strength influencing variables on CAD/CAM zirconia frameworks. *Dental Materials*. 2008, 24, 633–638.
- [20] MOHANTY, Saralashrita, Arun Prabhu RAMESHBABU, Shyamal MANDAL, Bo SU a Santanu DHARA. Critical issues in near net shape forming via green machining of ceramics: A case study of alumina dental crown. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2013, 1, 274–281.
- [21] KAMBOJ, R K, S DHARA a P BHARGAVA. Machining behaviour of green gelcast ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2003, 23, 1005–1011.
- [22] KOBAYASHI, Akira. S. Shigeyuki. *Advanced Technical Ceramics*. In: B.m.: Academic Press, 1989, 261–313.
- [23] GORIN, Alexander a M Mohan REDDY. Advanced Ceramics: Some Challenges and Solutions in Machining by Conventional Methods. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, 624–624, 42–47.
- [24] NG, S H, J B HULL a J L HENSHALL. Machining of novel alumina/cyanoacrylate green ceramic compacts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, 175, 299–305.
- [25] ALLOR, R.L. a S. JAHANMIR. Current problems and future directions for ceramic machining. *American Ceramics Society Bulletin*, 75, 7, 1996.
- [26] ZHANG, Bi, X L ZHENG, H TOKURA a M YOSHIKAWA. Grinding induced damage in ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 132, 353–364.
- [27] WAKUDA, Manabu, Yukihiko YAMAUCHI a Shuzo KANZAKI. Material response to particle impact during abrasive jet machining of alumina ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, 132, 177–183.
- [28] MARGARIDO, Alexandre, Benedito Moraes PURQUERIO, Cesar R FOSCHINI a Carlos Alberto FORTULAN. Influence of the green-machining parameters on the mechanical properties of alumina rods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, 88, 3475–3484.

- [29] JANSSEN, Rolf, Sven SCHEPPOKAT a Nils CLAUSSEN. Tailor-made ceramic-based components—Advantages by reactive processing and advanced shaping techniques. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008, 28, 1369–1379.
- [30] LUTHARDT, Ralph G, Mandy S HOLZHÜTER, Heike RUDOLPH, Volker HEROLD a Michael H WALTER. CAD/CAM-machining effects on Y-TZP zirconia. *Dental Materials*. 2004, 20, 655–662.
- [31] ELUC, Elektronická učebnice, Strojírenství. [online] [cit. 15.3.2018] Dostupná z: <https://www.eluc.kr-olomoucky.cz>
- [32] ŠTULPA, Miloslav. *CNC : obráběcí stroje a jejich programování*. 1. vyd. Praha: Praha : BEN - technická literatura, 2006.
- [33] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie : obrábění*. 3., přepr. a vyd. Brno: Brno : CERM, 2004.
- [34] DENRY, Isabelle a J Robert KELLY. State of the art of zirconia for dental applications. *Dental Materials*. 2008, 24, 299–307.
- [35] FILSER, F, P KOCHER a L J GAUCKLER. Net-shaping of ceramic components by direct ceramic machining. *Assembly Automation*. 2003, 23, 382–390.
- [36] KULKARNI, Sanket S, Yaowei YONG, Malgorzata J RYS a Shuting LEI. Machining assessment of nano-crystalline hydroxyapatite bio-ceramic. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013, 15, 666–672.
- [37] BISWAS, P, M SWATHI, P RAMAVATH, K RAJESWARI, M BUCHI SURESH a Roy JOHNSON. Diametral deformation behavior and machinability of methyl cellulose thermal gel cast processed alumina ceramics. *Ceramics International*. 2012, 38, 6115–6121.
- [38] DADHICH, Prabhash, Pavan KUMAR, Saralashrita MOHANTY a Santanu DHARA. Microfabrication of green ceramics : Contact vs . non-contact machining. *Journal of the European Ceramic Society*. 2015, 35, 3909–3916.
- [39] LEE, D. G., H. G. LEE, P. J. KIM a K. G. BANG. Micro-drilling of alumina green bodies with diamond grit abrasive micro-drills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003, 43(6), 551–558.
- [40] SHIN, H, P KWON, CK KOK, a E CASE. Machining Channels on Mesoscale Ceramic Components. *Journal of manufacturing processes*. 2004, (1998), 15–23.
- [41] REKOW, E D, Nrfá SILVA, P G COELHO, Y ZHANG, P GUESS a V P THOMPSON. Performance of Dental Ceramics: Challenges for Improvements. *Journal of Dental Research*. 2011, 90, 937–952.
- [42] BOSE, Susmita, Dongxu KE, Himanshu SAHASRABUDHE a Amit BANDYOPADHYAY. Progress in Materials Science Additive manufacturing of biomaterials. *Progress in Materials Science*. 2018, 93, 45–111.
- [43] PRAKASH, K Satish, T NANCHARAIH a V V Subba RAO. ScienceDirect Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview. *Materials Today: Proceedings*. 2018, 5(2), 3873–3882.

- [44] ČSN EN ISO 4287. GEOMETRICKÉ POŽADAVKY NA VÝROBKY (GPS),
Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury
povrchu. PRAHA: ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI,
METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. 1999
- [45] ČSN EN ISO 3274. GEOMETRICKÉ POŽADAVKY NA VÝROBKY (GPS),
Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových
(hrotových) přístrojů. PRAHA: ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI,
METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. 1999
- [46] ČSN EN ISO 4288. GEOMETRICKÉ POŽADAVKY NA VÝROBKY (GPS),
Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury
povrchu. PRAHA: ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI,
METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. 1999
- [47] ČSN EN ISO 8785. GEOMETRICKÉ POŽADAVKY NA VÝROBKY (GPS),
Nedokonalosti povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry.
PRAHA: ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A
STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. 2000

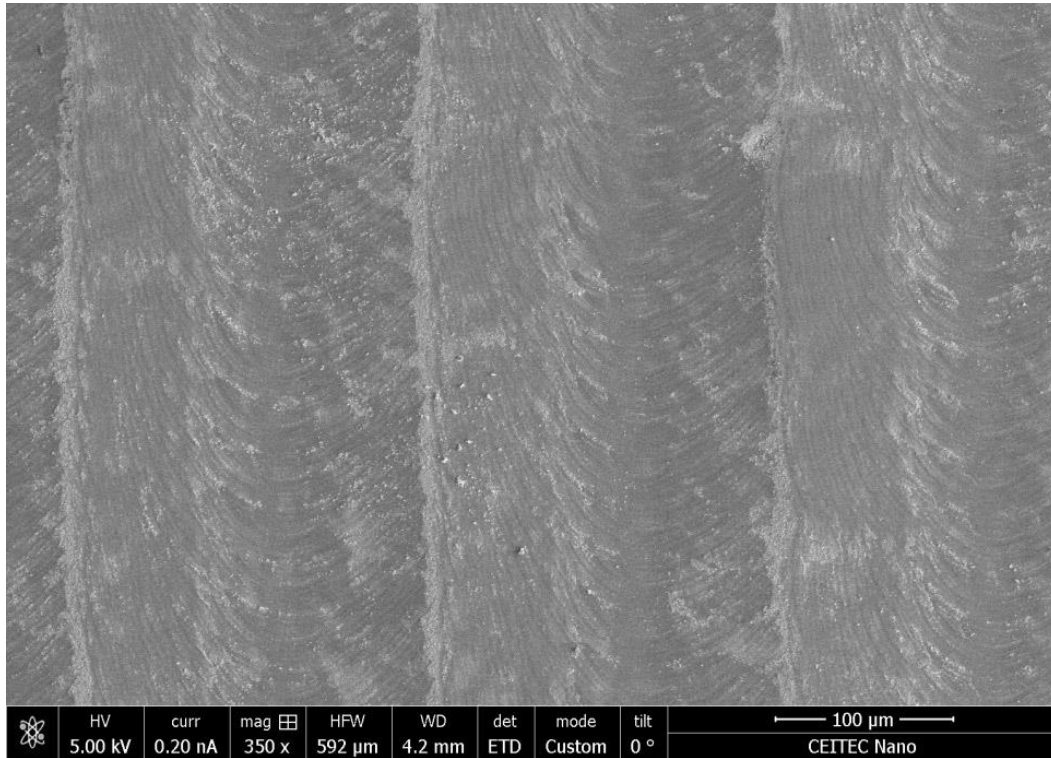
PŘÍLOHA



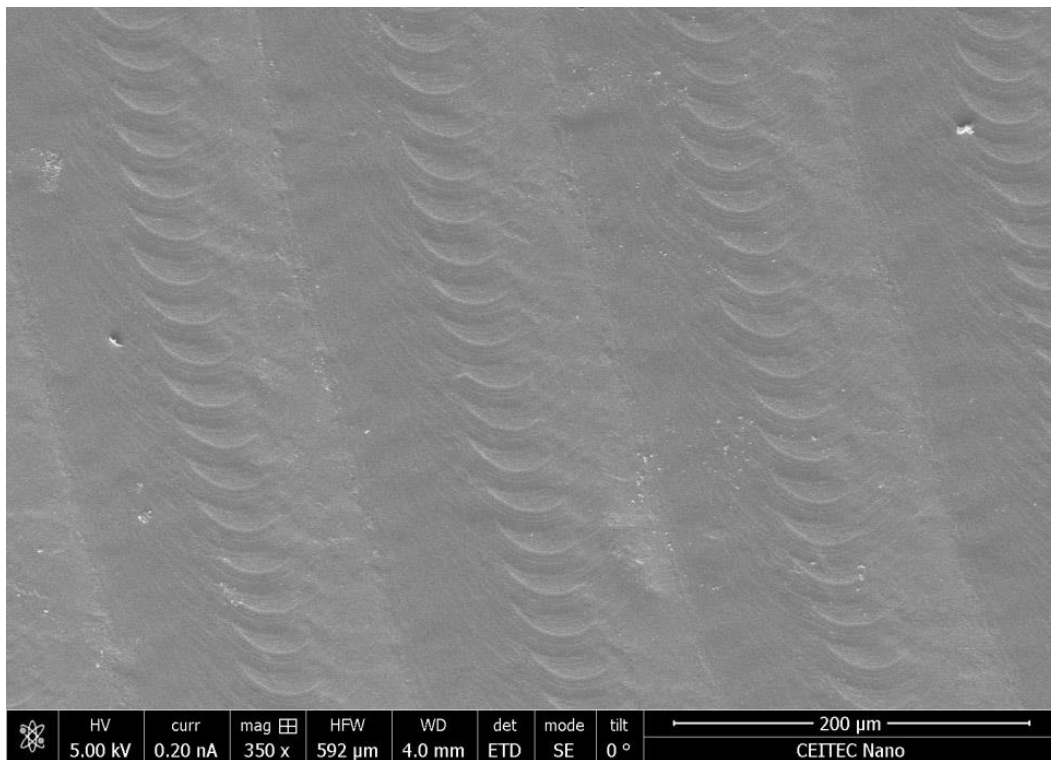
P-Obr. 1 Kulová fréza Karnasch 30 6553 0200 120 s definovanovanou geometrií



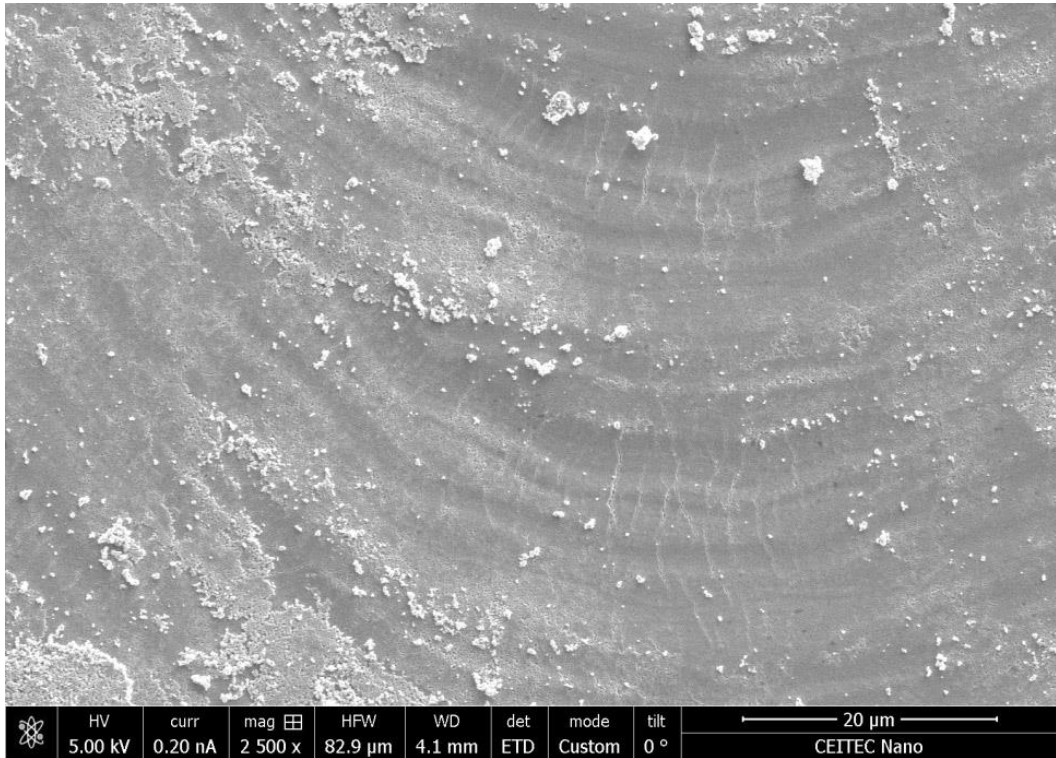
P-Obr. 2 Plochá fréza Karnasch 30 6542 0200 100 s definovanovanou geometrií



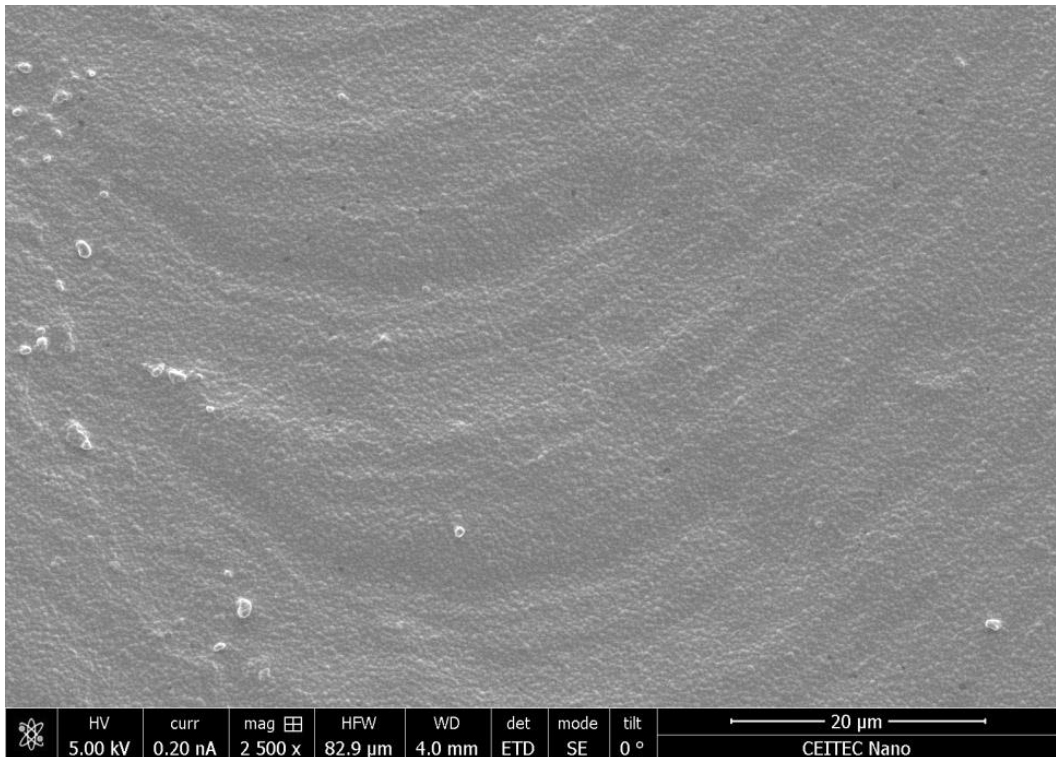
P-Obr. 3 Stav povrchu vzorku ZrO₂ obrobeneho strategií b-0.1-0.2 v nevyžihaném stavu před slinováním



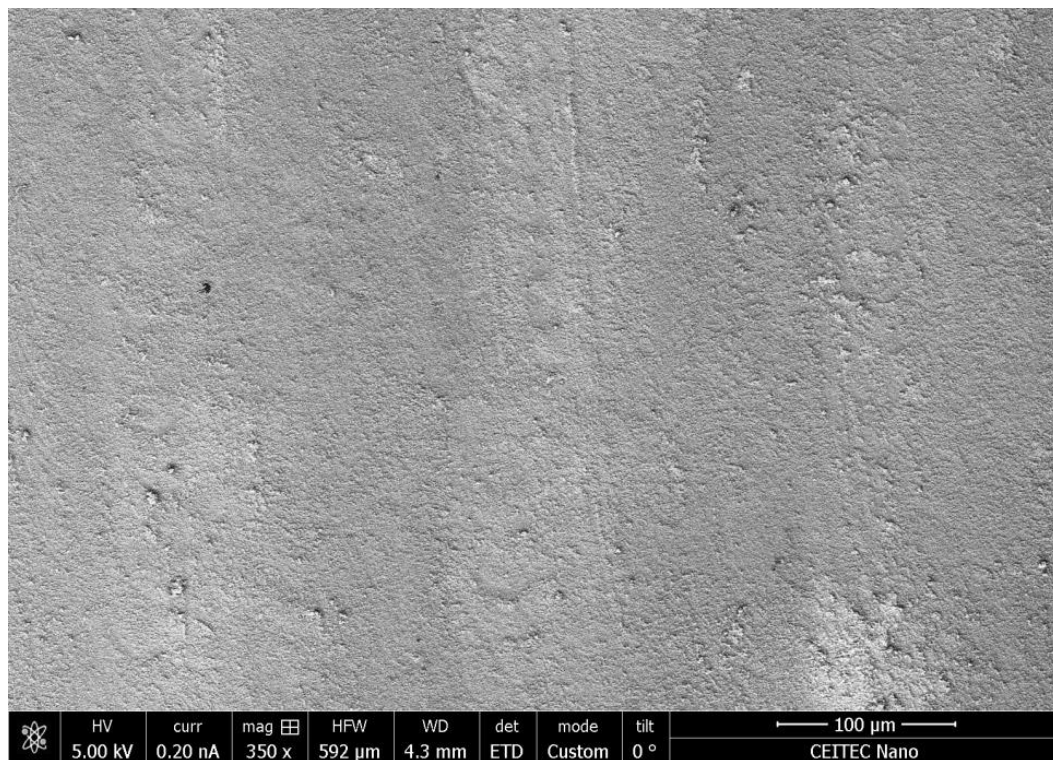
P-Obr. 4 Stav povrchu vzorku ZrO₂ obrobeneho strategií b-0.1-0.2 v nevyžihaném stavu po slinování



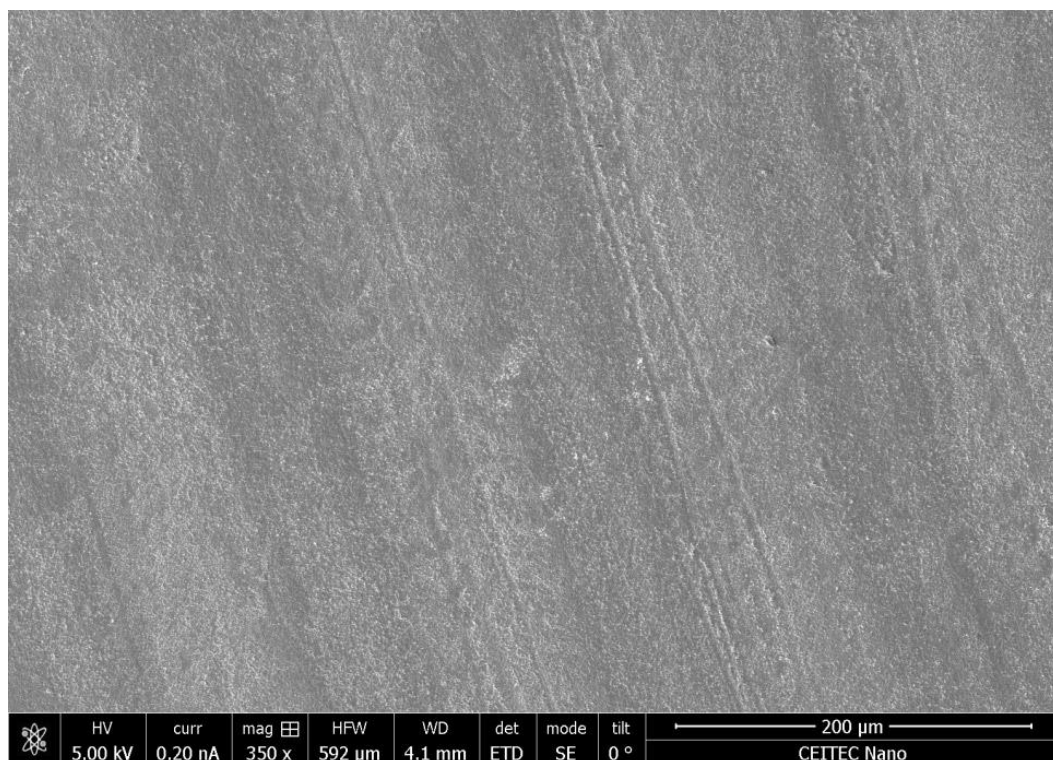
P-Obr. 5 Trhliny na povrchu vzorku ZrO_2 obrobeneho strategií b-0.5-0.1 v nevyžíhaném stavu před slinováním



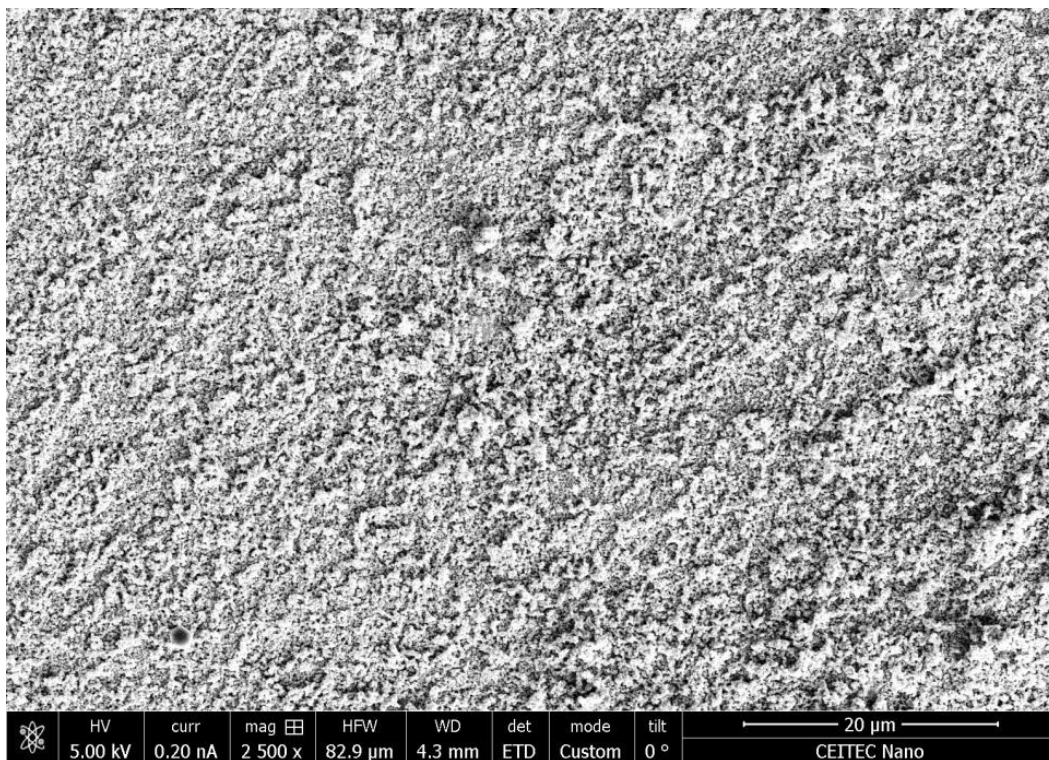
P-Obr. 6 Stav trhlin na povrchu vzorku ZrO_2 obrobeneho strategií b-0.5-0.1 v nevyžíhaném stavu po slinování



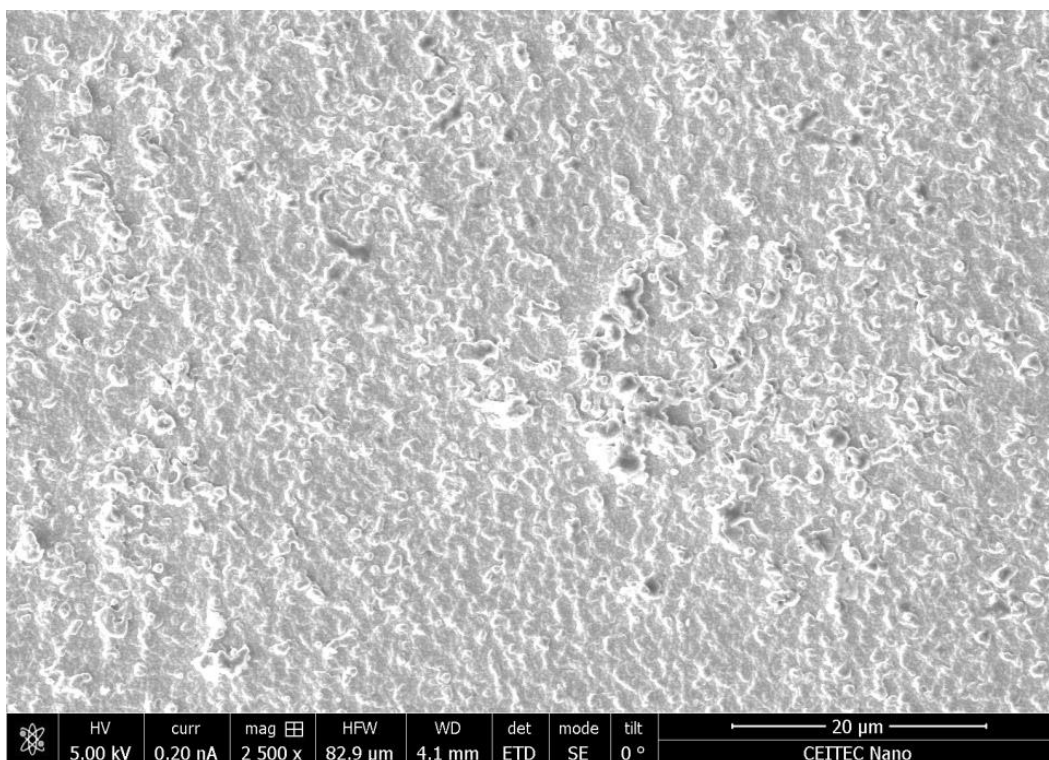
P-Obr. 7 Stav povrchu vzorku ZrO_2 obrobeneho strategií b-0.5-0.2 ve stavu vyžihaném na 900 °C před slinováním



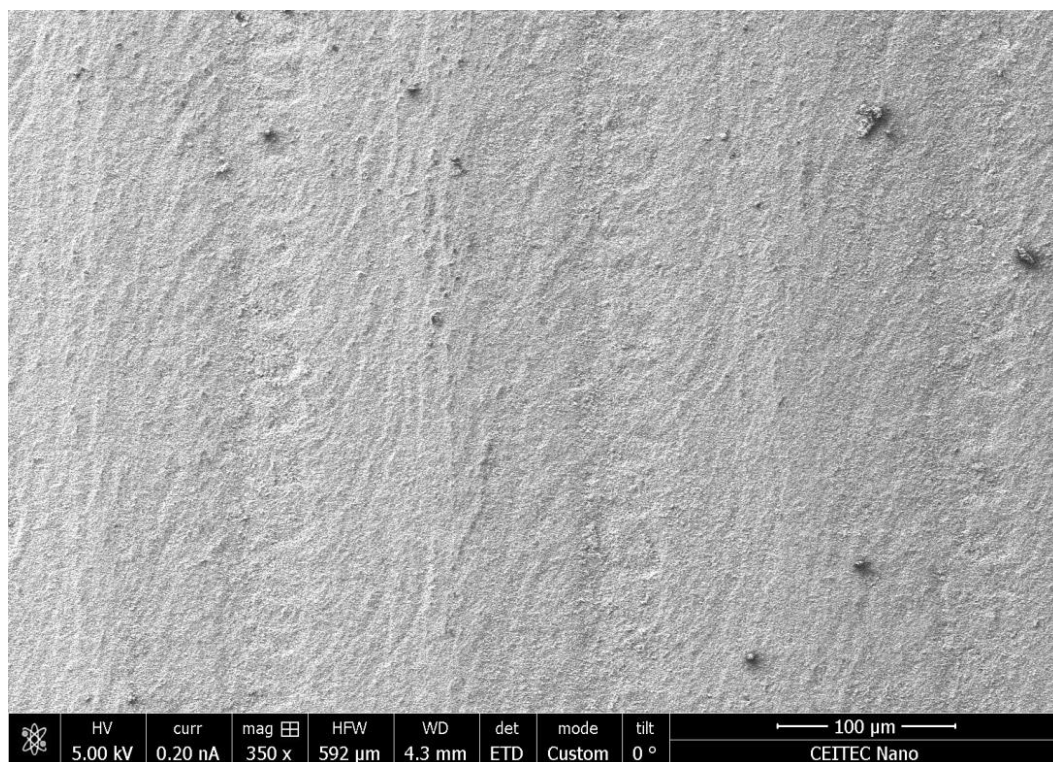
P-Obr. 8 Stav povrchu vzorku ZrO_2 obrobeneho strategií b-0.5-0.2 ve stavu vyžihaném na 900 °C po slinování



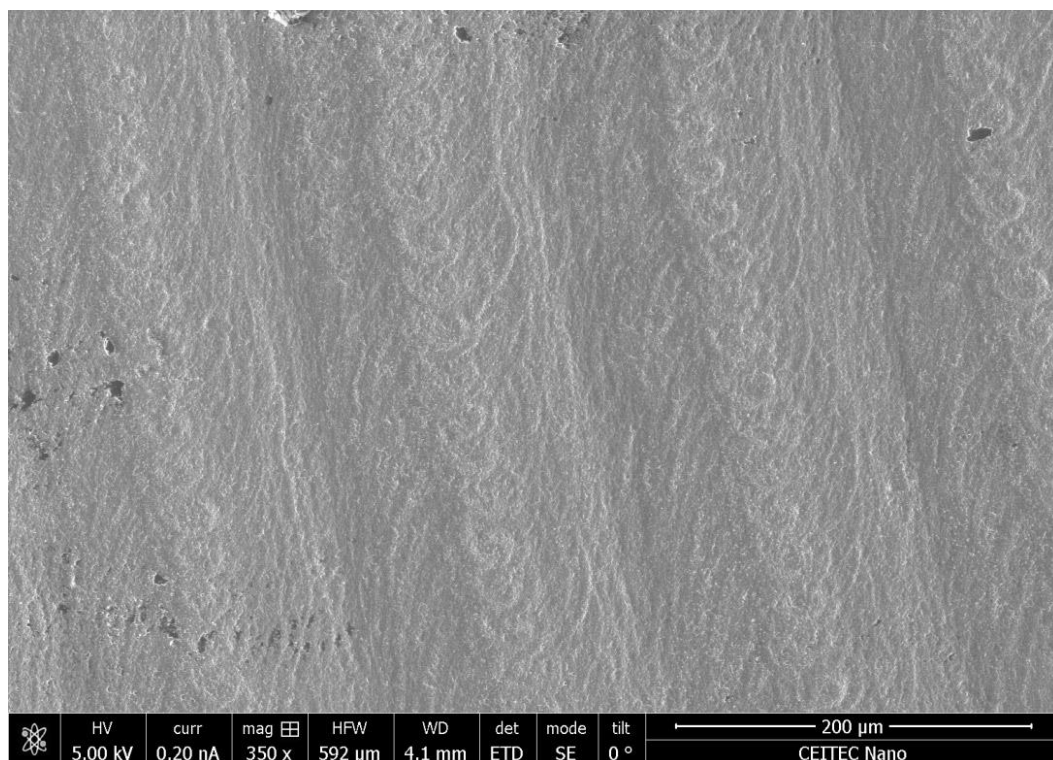
P-Obr. 9 Detail povrchu vzorku ZrO_2 obrobeneho strategií b-0.1-0.2 ve stavu vyžihaném na 900 °C před slinováním



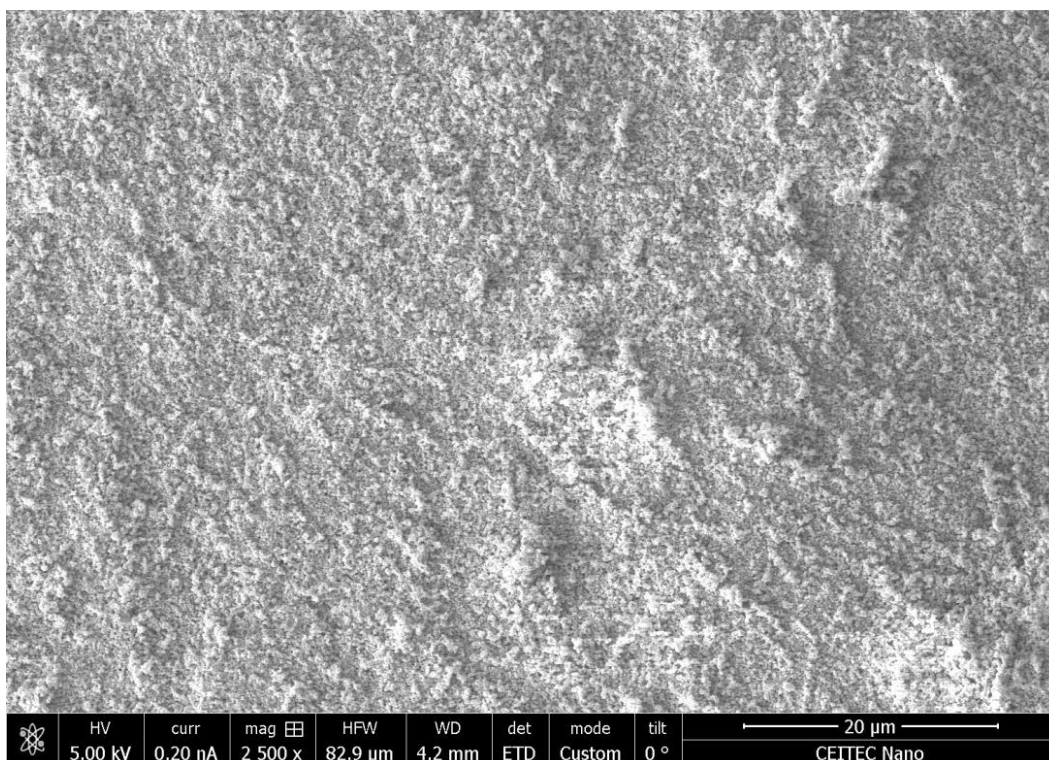
P-Obr. 10 Detail povrchu vzorku ZrO_2 obrobeneho strategií b-0.1-0.2 ve stavu vyžihaném na 900 °C po slinování



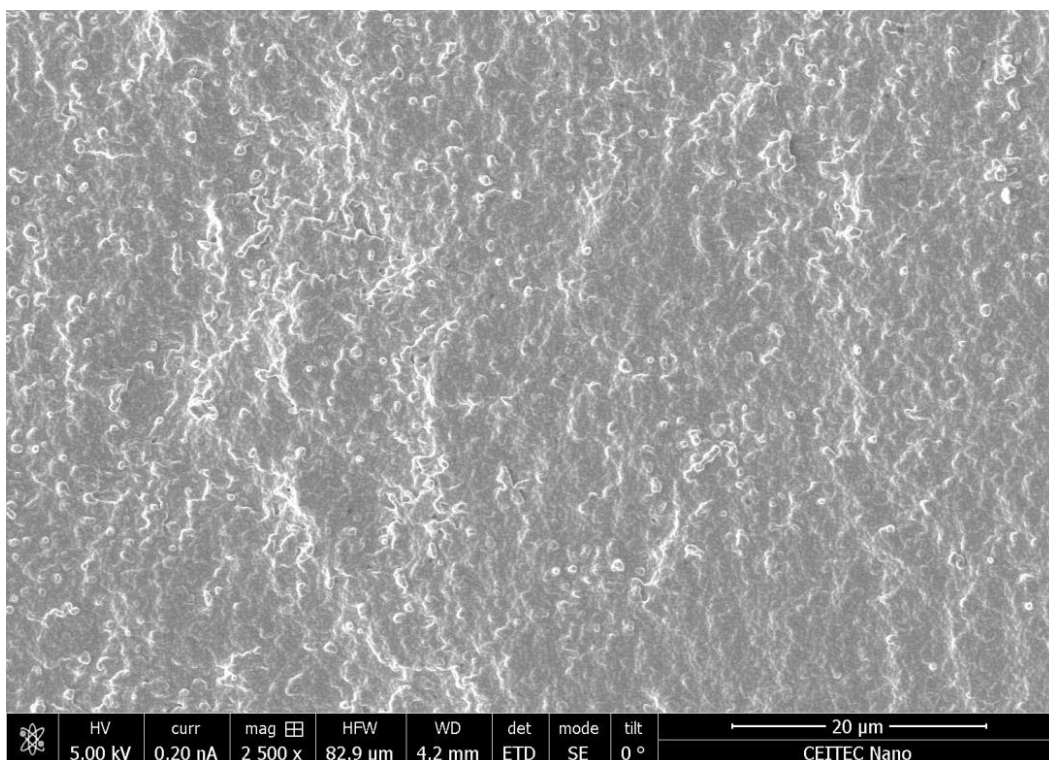
P-Obr. 11 Stav povrchu vzorku ZrO_2 obrobeneho strategií b-0.1-0.2 ve stavu vyžihaném na 1100 °C před slinováním



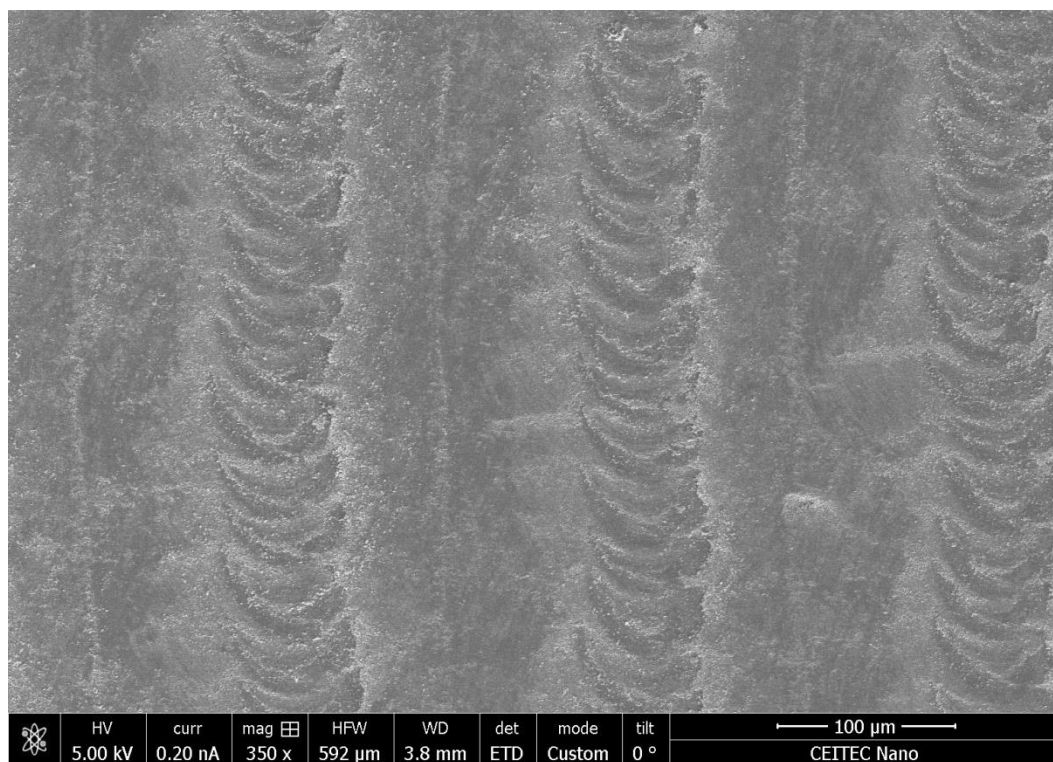
P-Obr. 12 Stav povrchu vzorku ZrO_2 obrobeneho strategií b-0.1-0.2 ve stavu vyžihaném na 1100 °C po slinování



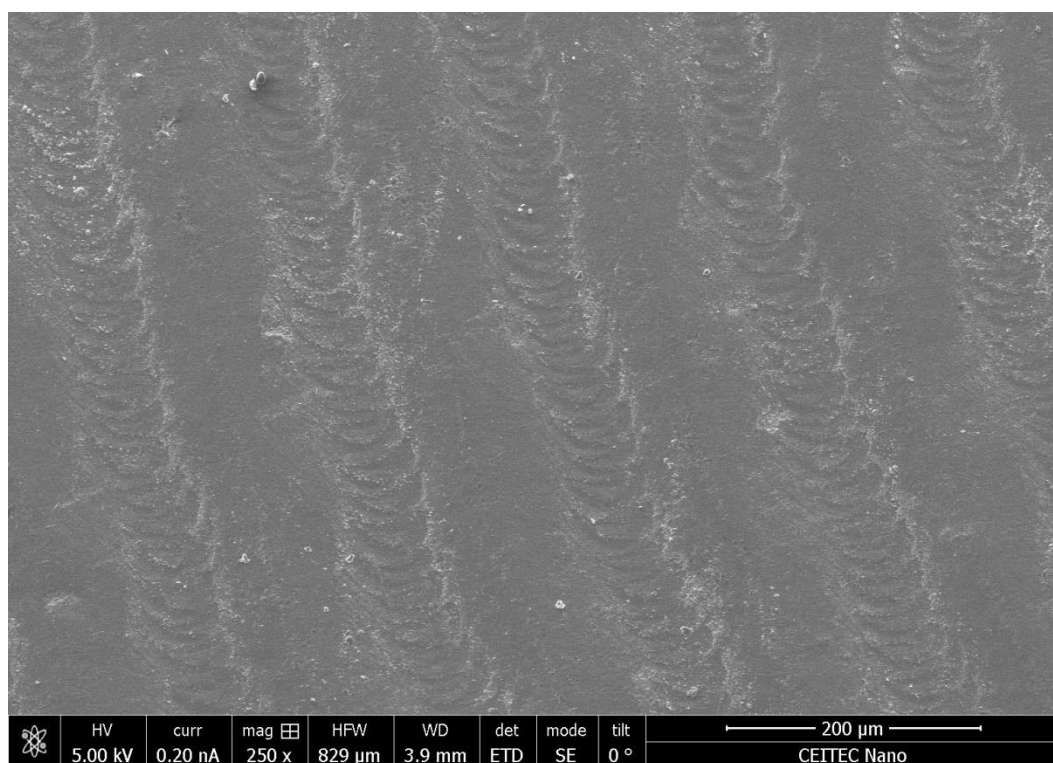
P-Obr. 13 Detail povrchu vzorku ZrO_2 obrobeneho strategií b-0.5-1.0 ve stavu vyžihaném na 1100 °C před slinováním



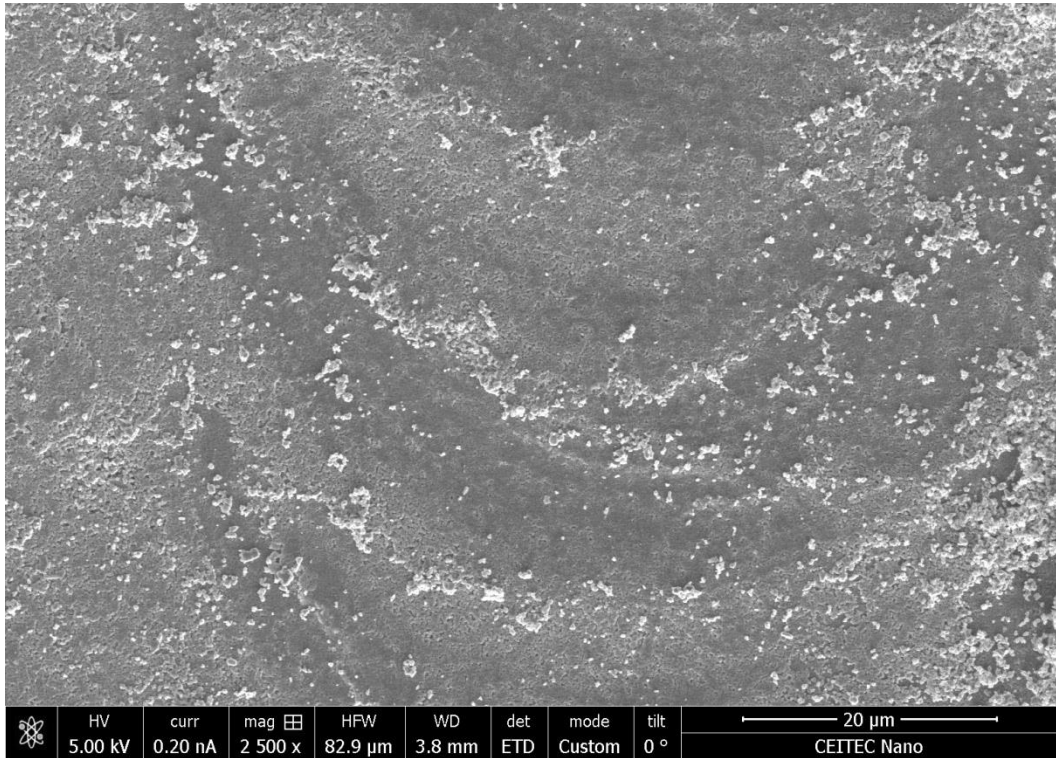
P-Obr. 14 Detail povrchu vzorku ZrO_2 obrobeneho strategií b-0.5-1.0 ve stavu vyžihaném na 1100 °C po slinování



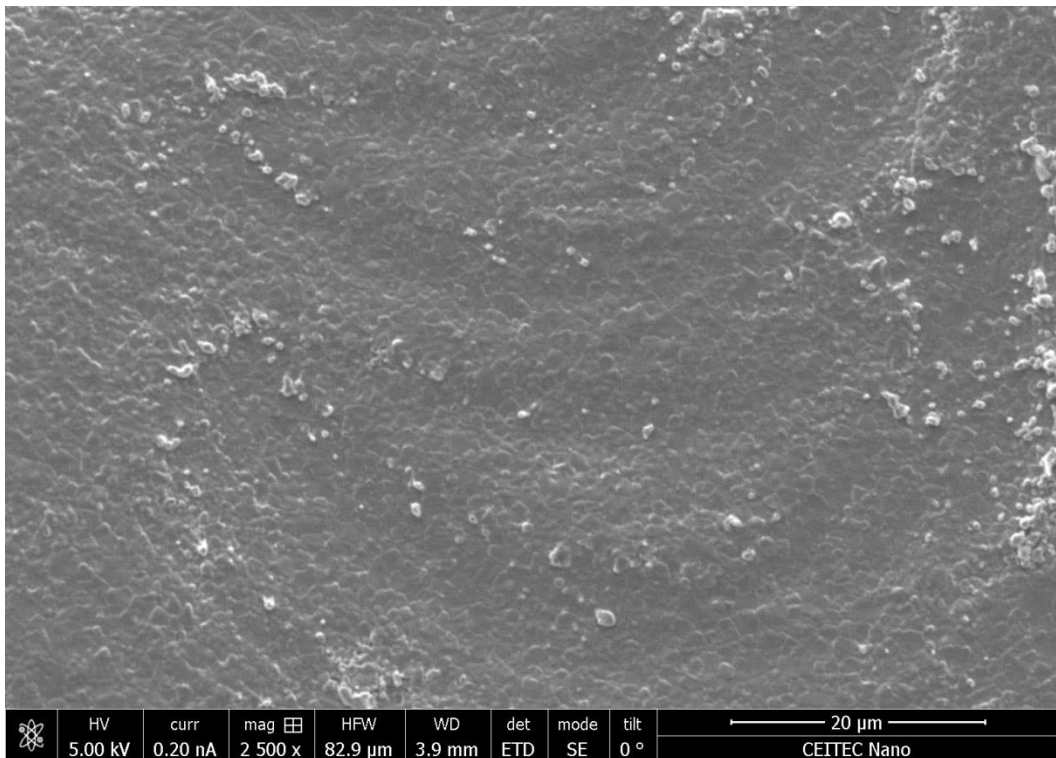
P-Obr. 15 Stav povrchu vzorku Al_2O_3 obrobeneho strategií b-0.5-0.2 v nevyžíhaném stavu před slinováním



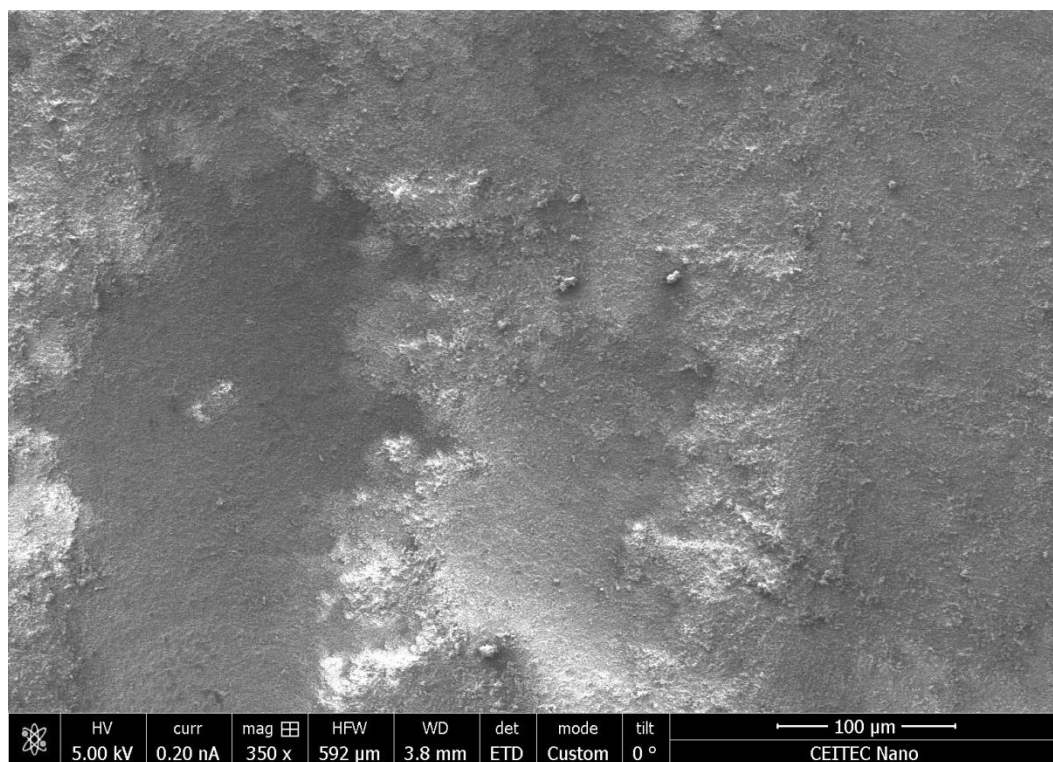
P-Obr. 16 Stav povrchu vzorku Al_2O_3 obrobeneho strategií b-0.5-0.2 v nevyžíhaném stavu po slinování



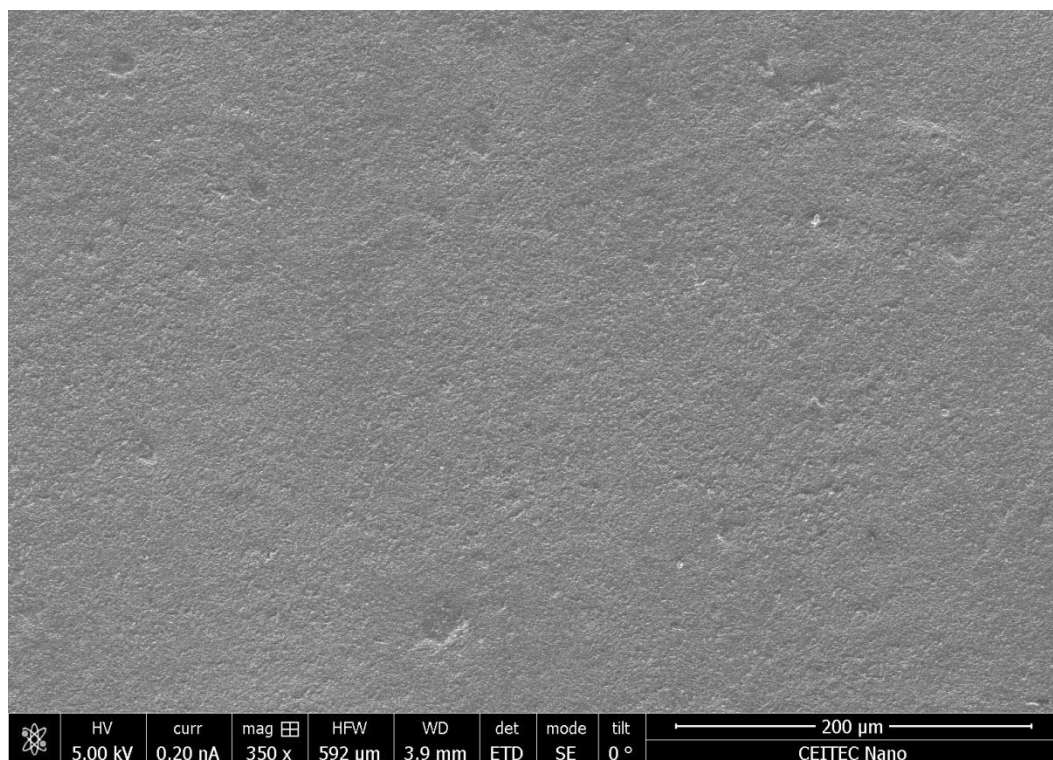
P-Obr. 17 Detail povrchu vzorku Al_2O_3 obrobeneho strategií b-0.5-0.2 v nevyžíhaném stavu před slinováním



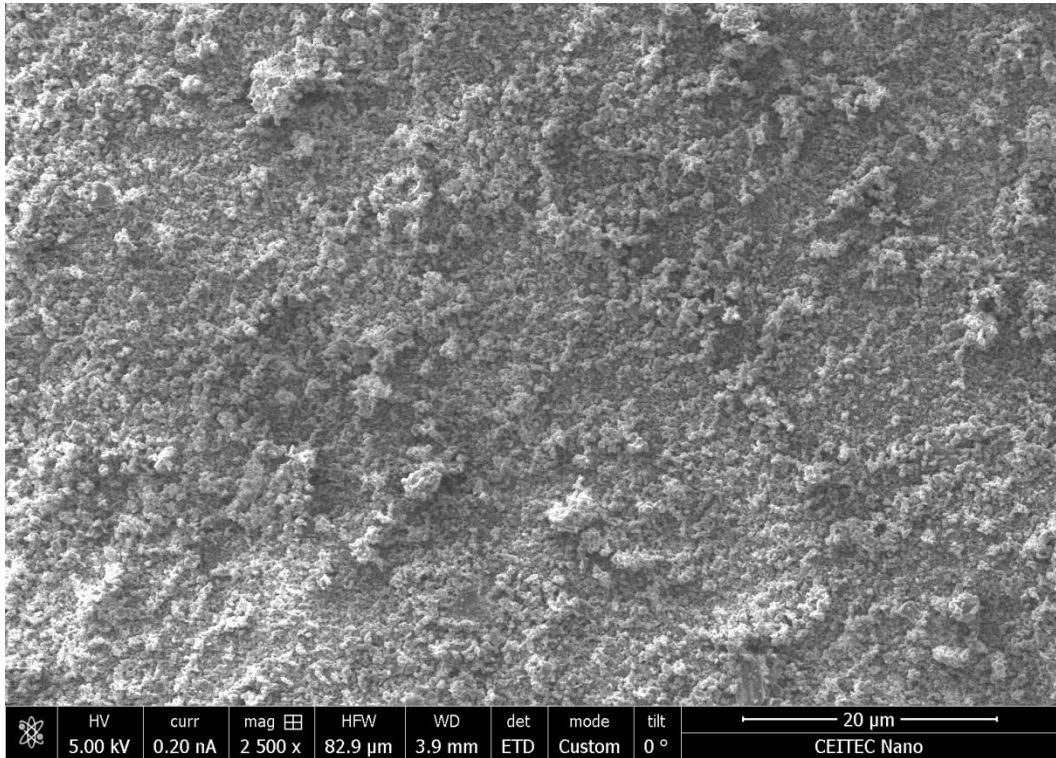
P-Obr. 18 Detail povrchu vzorku Al_2O_3 obrobeneho strategií b-0.5-0.2 v nevyžíhaném stavu po slinování



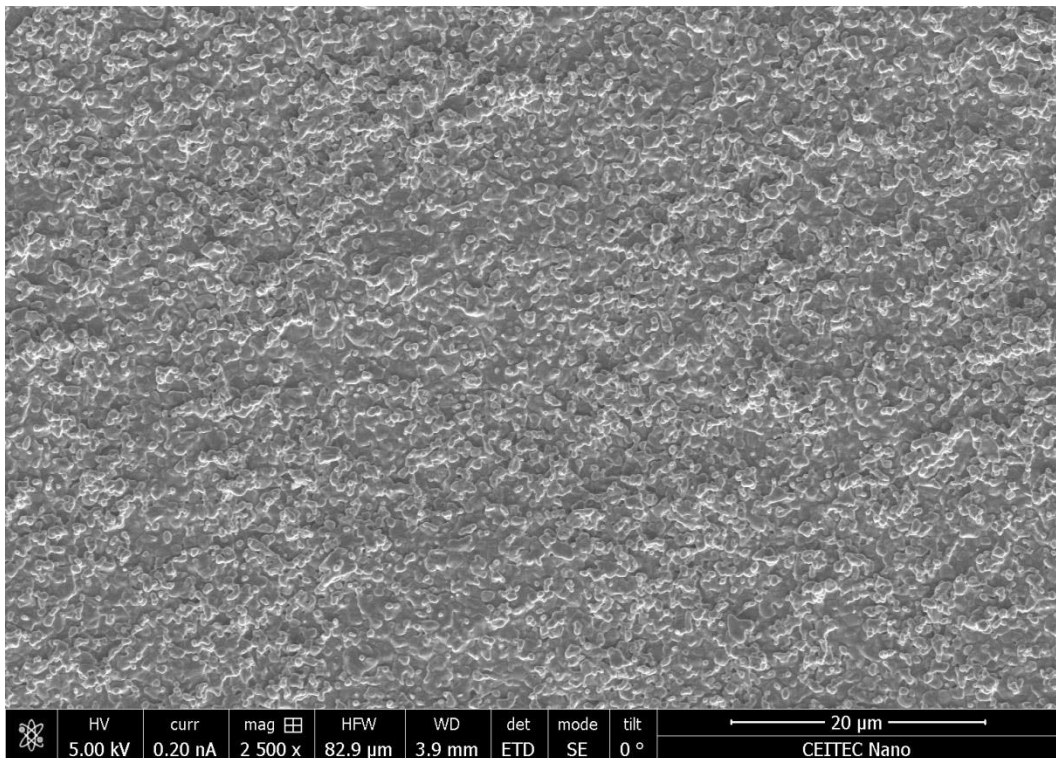
P-Obr. 19 Stav povrchu vzorku Al_2O_3 obrobeneho strategií b-0.1-0.2 ve stavu vyžihaném na 800 °C před slinováním



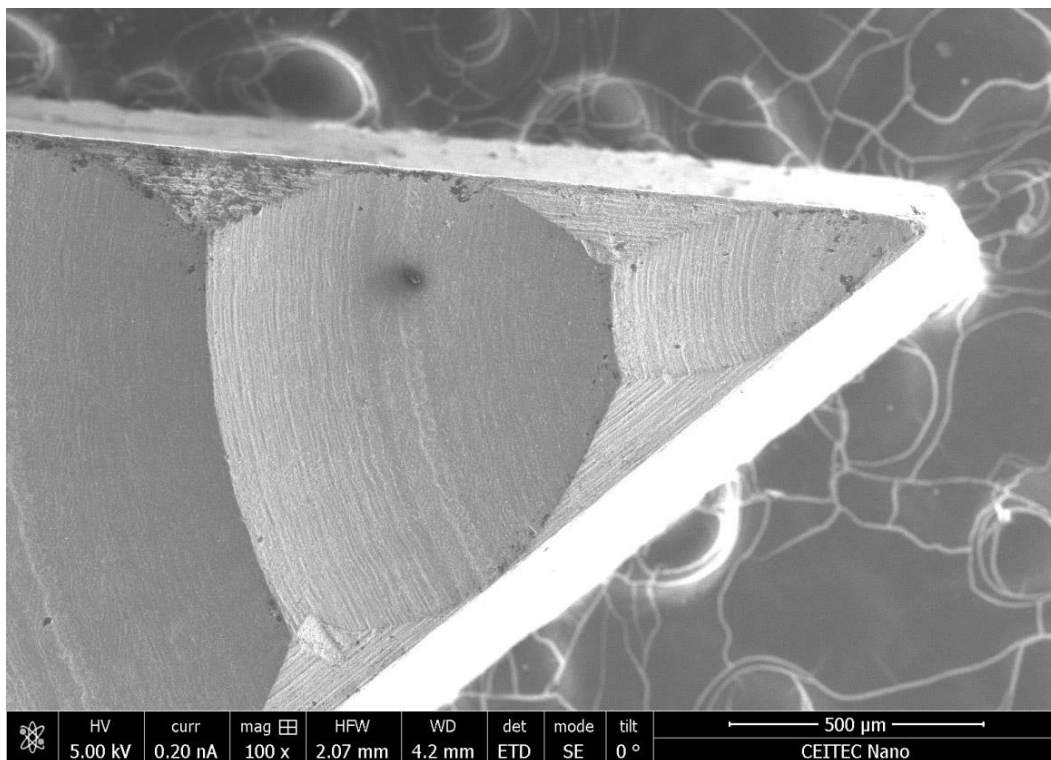
P-Obr. 20 Stav povrchu vzorku Al_2O_3 obrobeneho strategií b-0.1-0.2 ve stavu vyžihaném na 800 °C před slinování



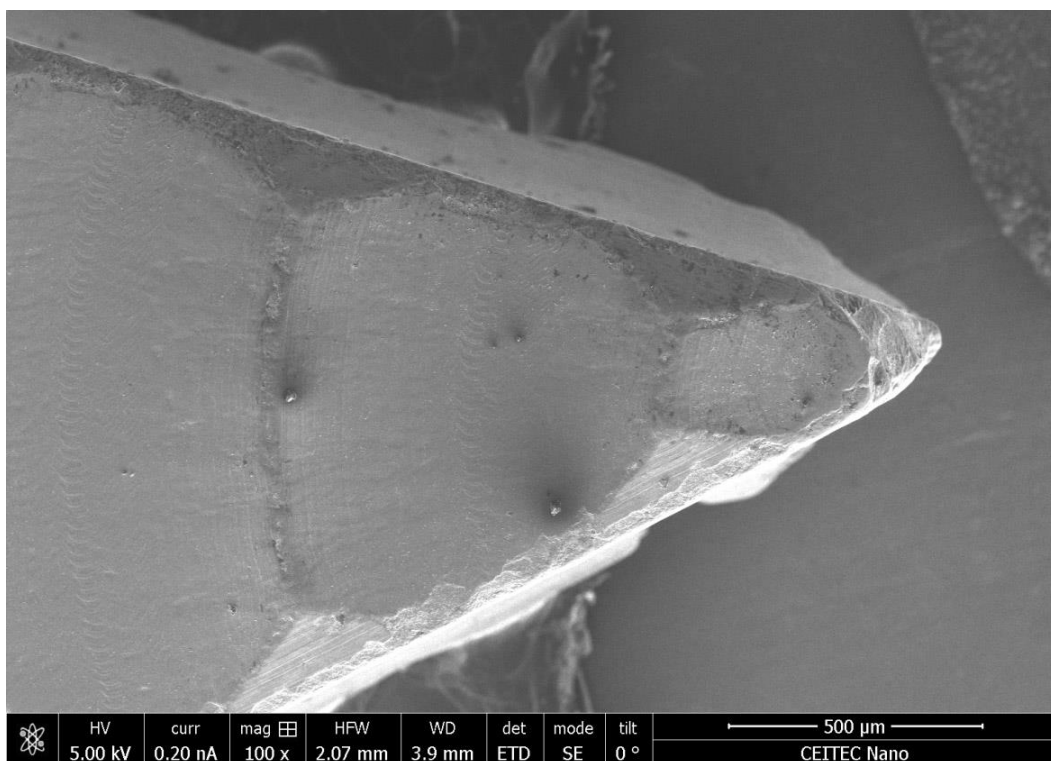
P-Obr. 21 Detail povrchu vzorku Al_2O_3 obrobeneho strategií b-0.1-0.2 ve stavu vyžihaném na 800 °C před slinováním



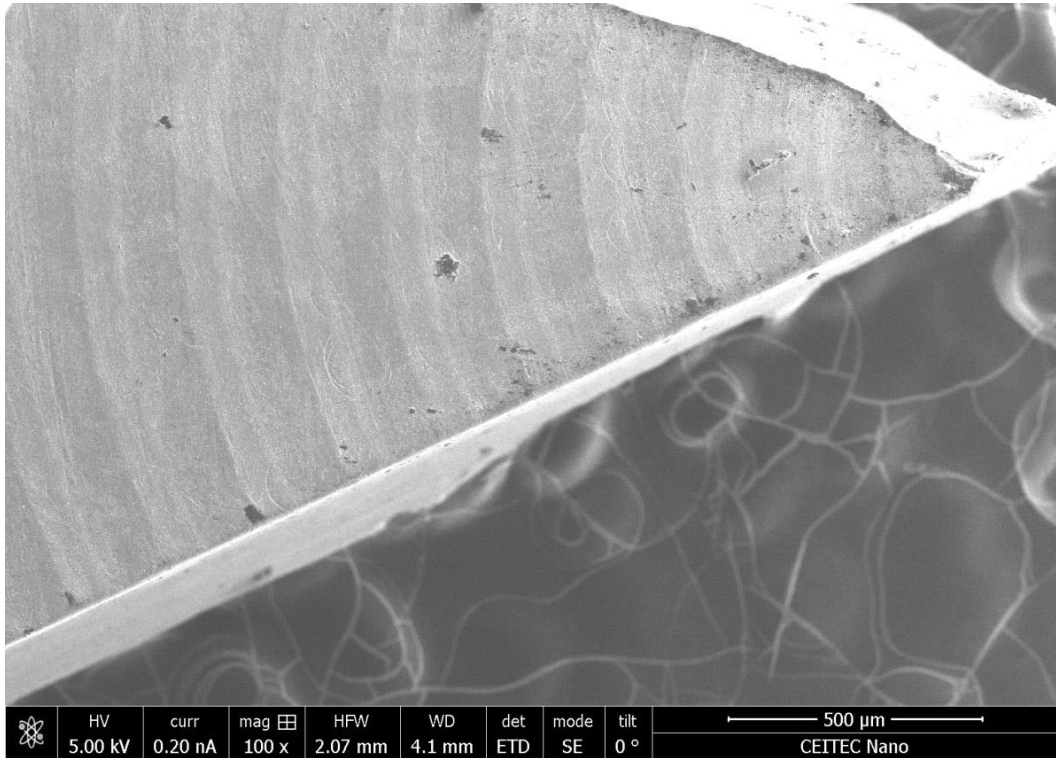
P-Obr. 22 Detail povrchu vzorku Al_2O_3 obrobeneho strategií b-0.1-0.2 ve stavu vyžihaném na 800 °C po slinování



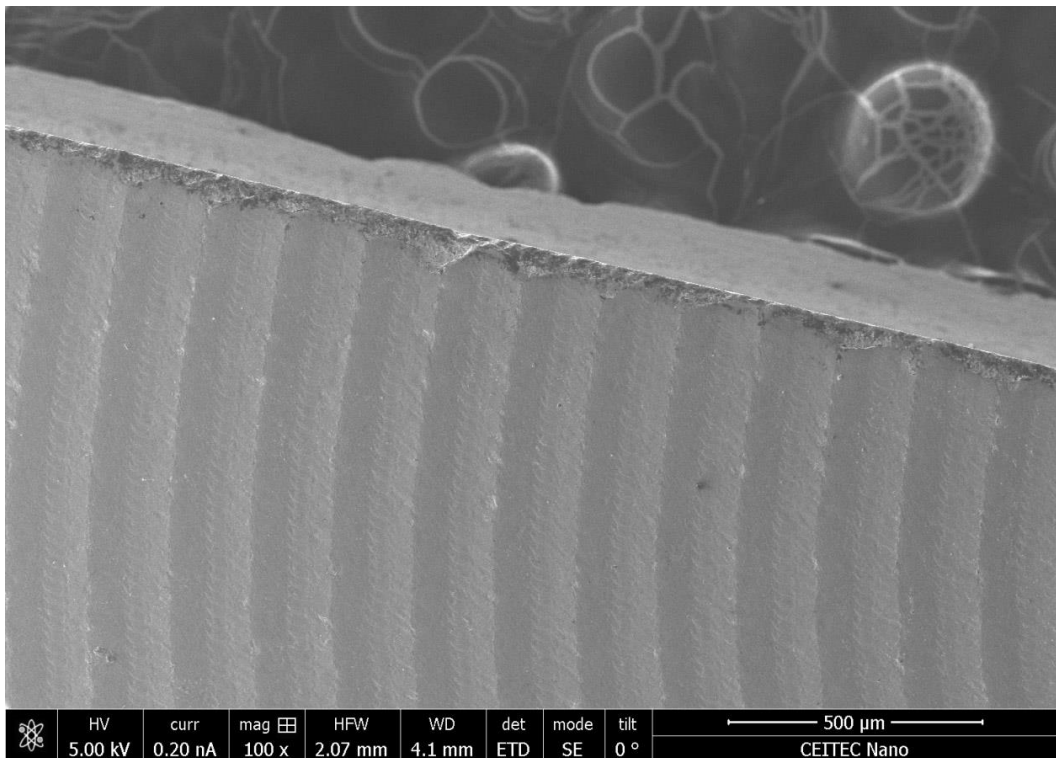
P-Obr. 23 Špice ZrO₂ obrobena strategii b-0.1-1.0 ve vyžiháném stavu na 1100°C



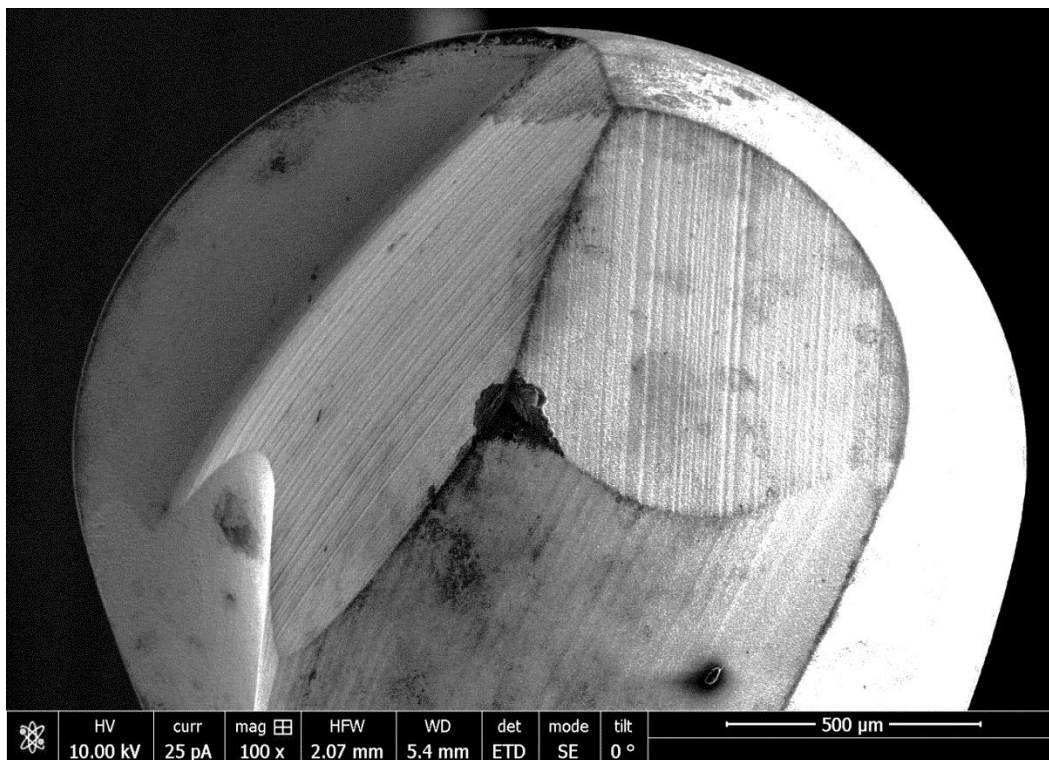
P-Obr. 24 Špice ZrO₂ obrobena strategii b-0.1-1.0 v nevyžiháném stavu



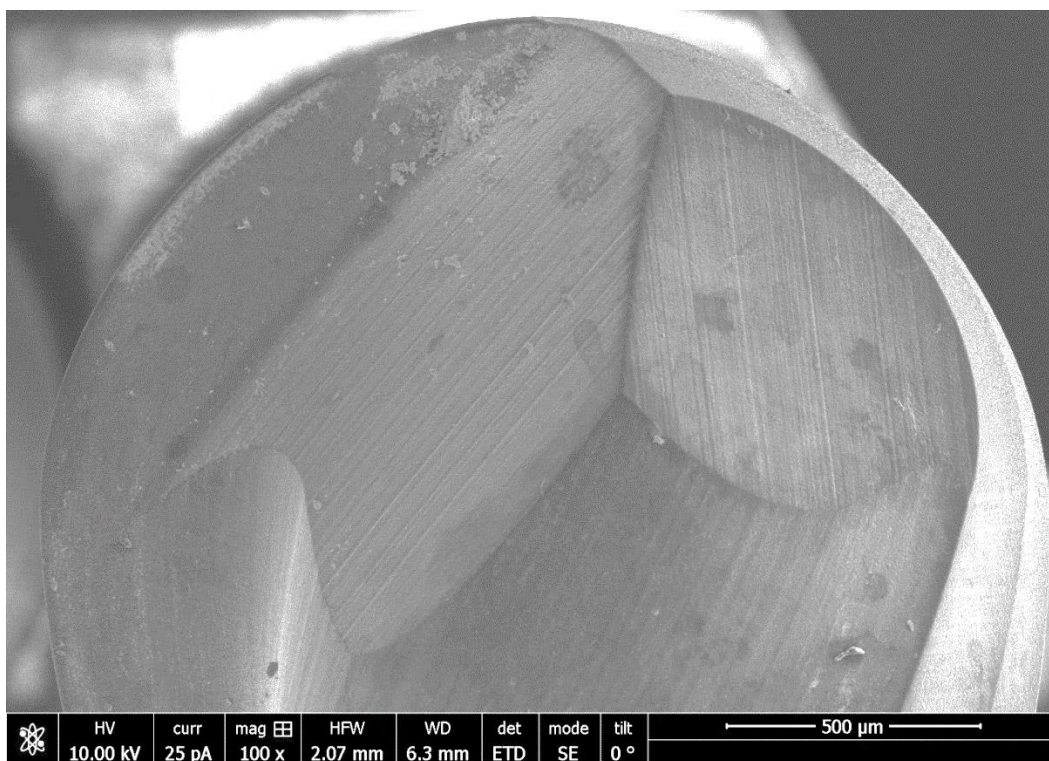
P-Obr. 25 Vjezdová hrana vzorku ZrO_2 ve vyžíhaném stavu obrobeneho strategií b-0.25-0.25 (po slinování)



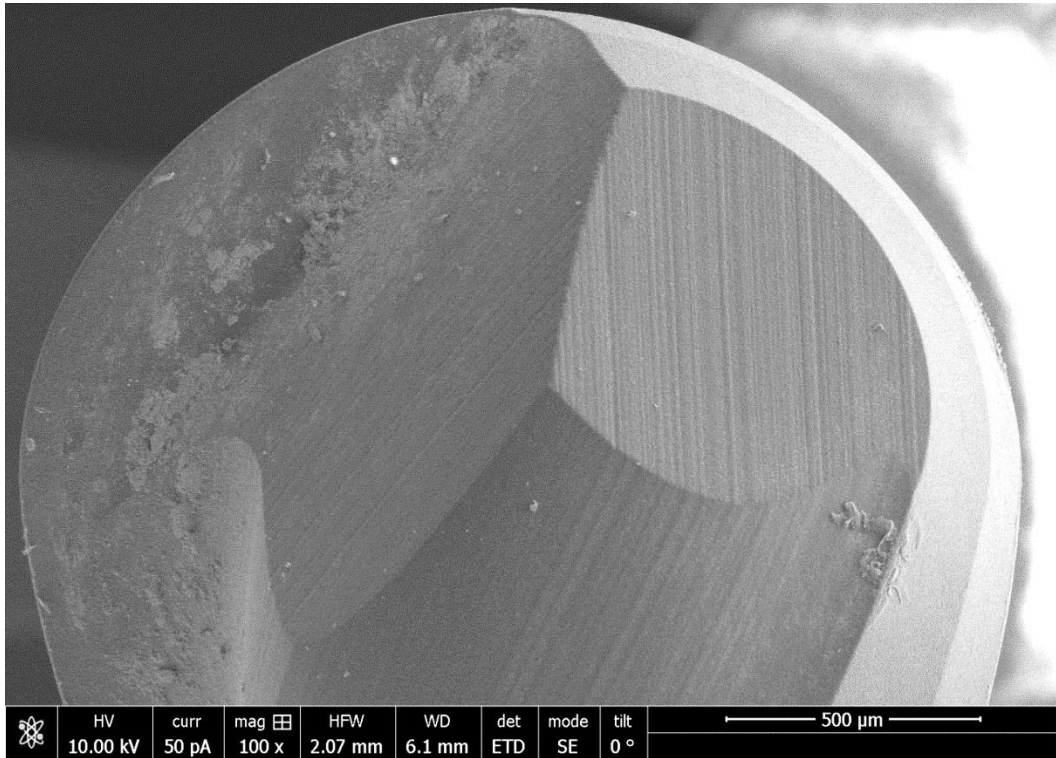
P-Obr. 26 Výjezdová hrana vzorku ZrO_2 v nevyžíhaném stavu obrobeneho strategií b-0.5-0.2 (po slinování)



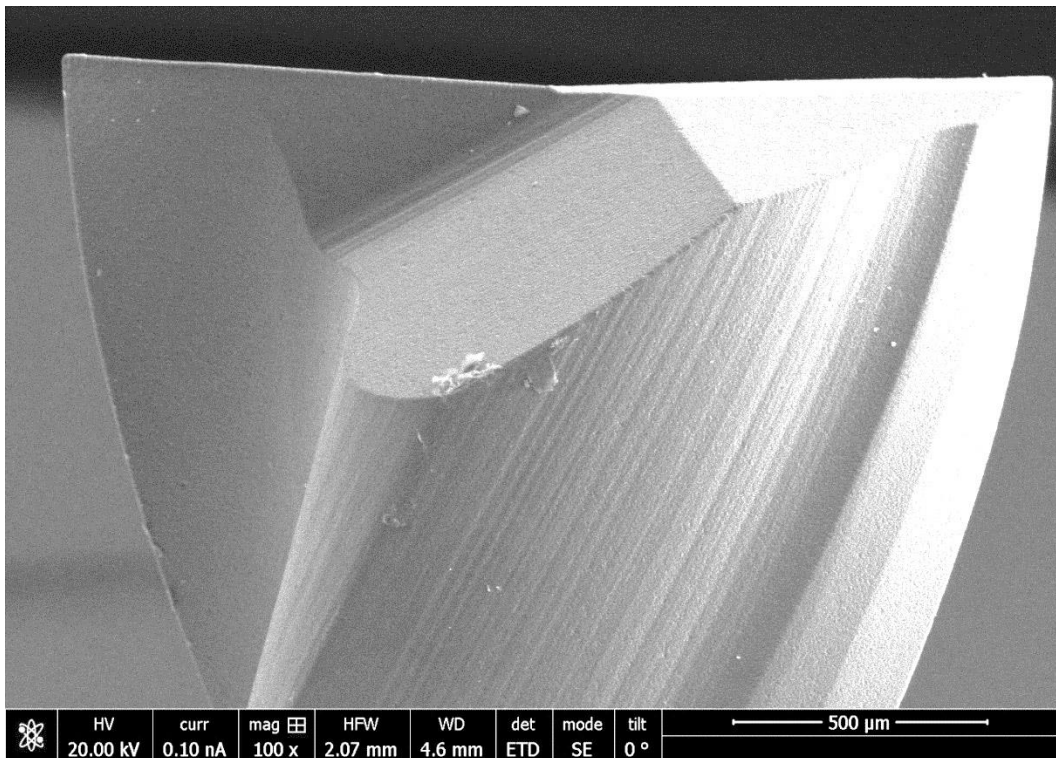
P-Obr. 27 Snímek nového nástroje, fréza Karnasch 30 6553 0200 120



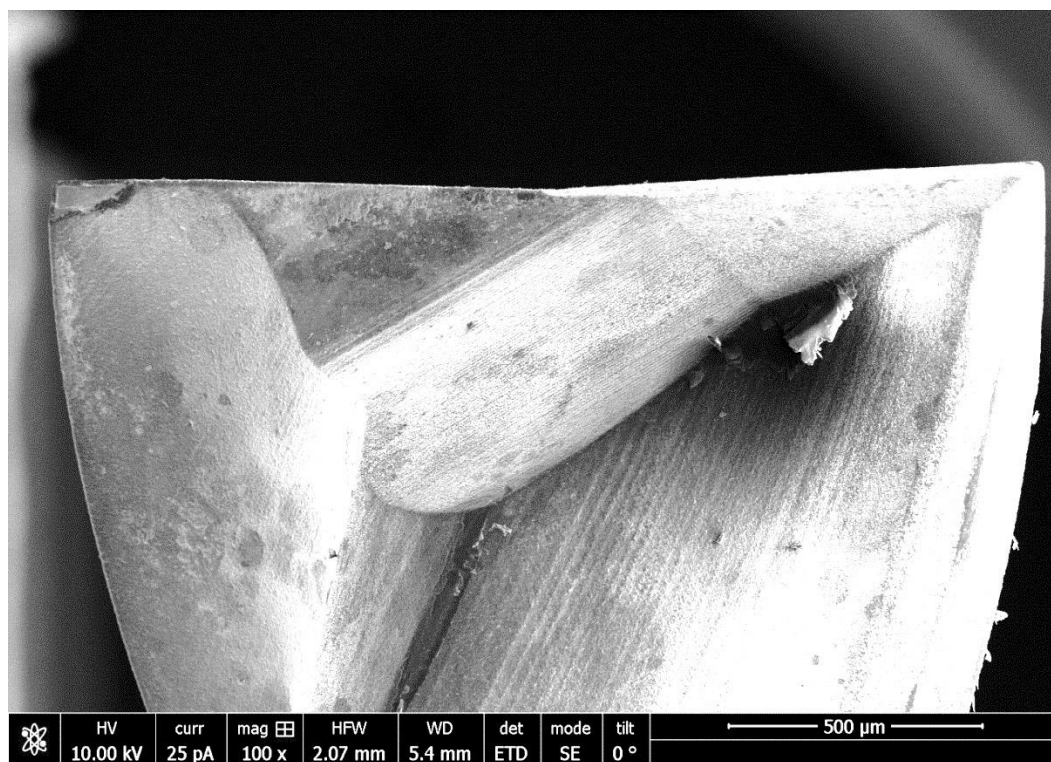
P-Obr. 28 Snímek použitého nástroje, fréza Karnasch 30 6553 0200 120 po obrobení 21 ks disků ZrO₂, disky byly obrobeny ve stavu nevyžíhaném, vyžíhaném na 900 a 1100 °C



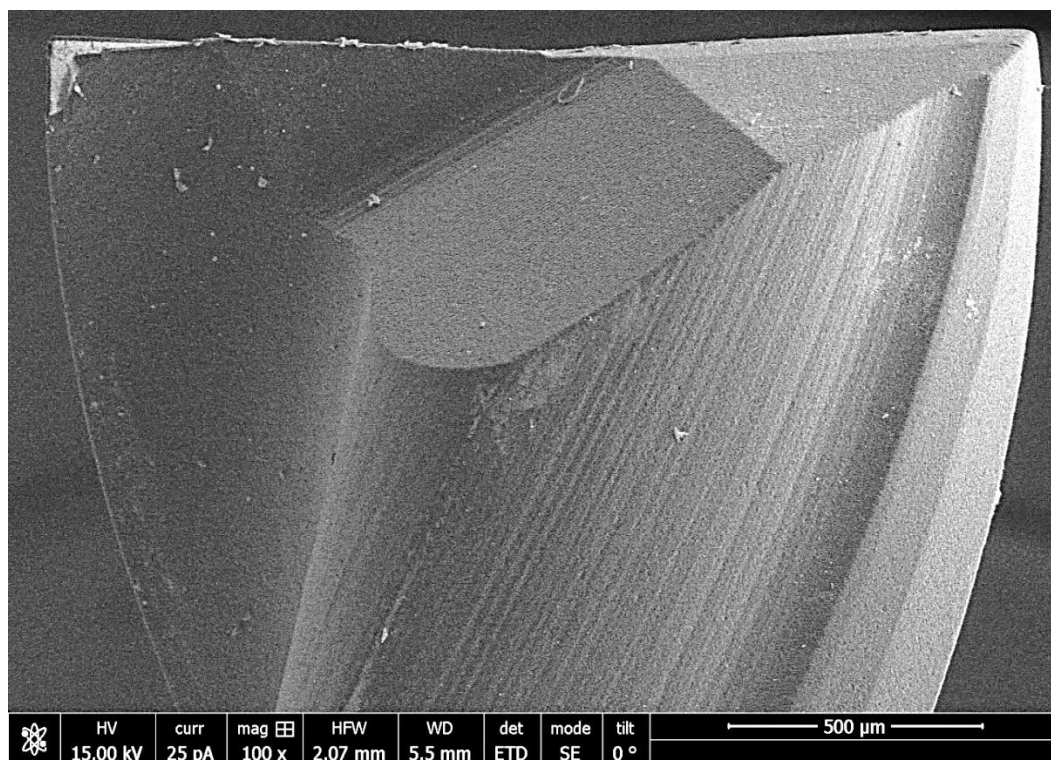
P-Obr. 29 Snímek použitého nástroje fréza Karnasch 30 6553 0200 120 po obrobení 14 ks disků Al₂O₃, disky byly obrobene ve stavu nevyžihaném, vyžihaném na 800 °C



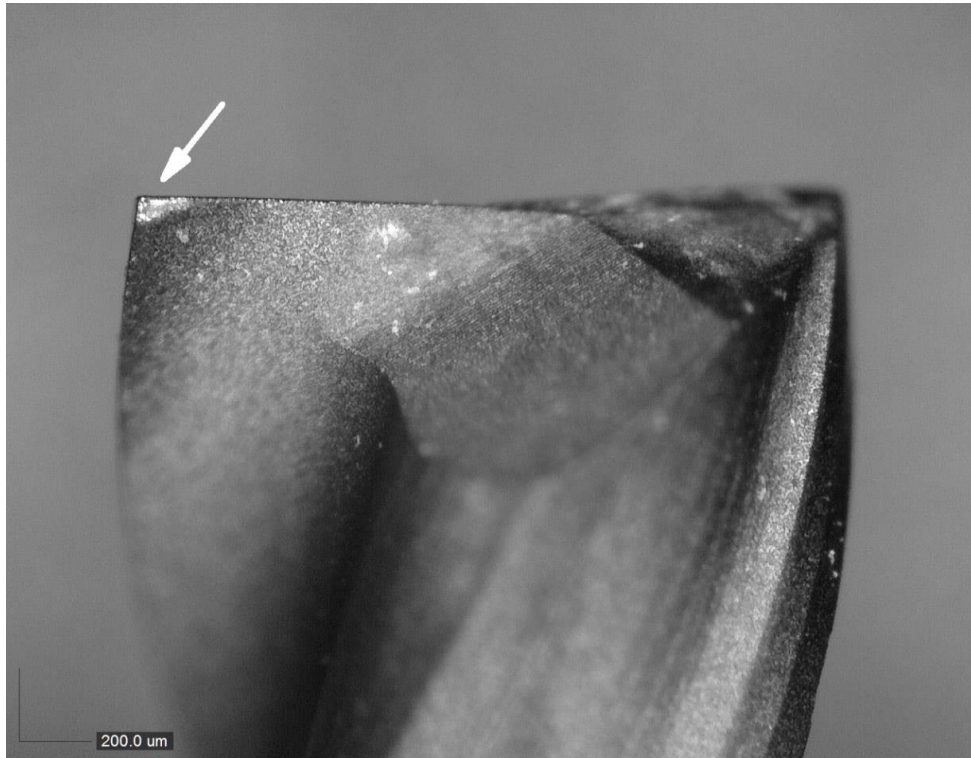
P-Obr. 30 Snímek nového nástroje, fréza Karnasch 30 6542 0200 100



P-Obr. 31 Snímek použitého nástroje fréza Karnasch 30 6542 0200 100 po obrobení 21 ks disků ZrO_2 ,
disky byly obrobeny ve stavu nevyžíhaném, vyžíhaném na 900 a 1100 °C



P-Obr. 32 Snímek použitého nástroje, fréza Karnasch 30 6542 0200 100 po obrobení 14 ks disků Al_2O_3 ,
disky byly obrobeny ve stavu nevyžíhaném, vyžíhaném na 800 °C



P-Obr. 33 Snímek použitého nástroje fréza Karnasch 30 6542 0200 100 po obrobení dvou disků Al_2O_3 vyžihaných na 900 a 1000 °C (snímek je pořízen pomocí digitálního fotoaparátu Dinolite, ve zvětšení 150x, měřítko odpovídá skutečnosti)