

VYHODNOCOVÁNÍ STRUKTUROVANÝCH POVRCHŮ POMOCÍ MATLABU

V. Hotař

Technická univerzita v Liberci, Katedra sklářských strojů a robotiky

Abstract

The article is intended on application of the fractal geometry with combination of statistic tool for a quantification of surface changes and describes analyses of data from a surface roughness tester and from an electron microscope. The first results from the analyses are used for definition of properties for next large analyses.

1 Úvod

Vyhodnocování strukturovaných povrchů jak pro vědecké účely, tak pro užití výsledků v praxi může být problematické. Fraktální geometrie [1–4] představuje perspektivní nástroj, který umožňuje kvantifikovat složitost a strukturovanost objektů a dat. Lépe popisuje objekty vyskytující se v přírodě a často i data získaná měřením procesů kolem nás. Fraktální geometrie používá k popisu těles, struktur, křivek a časových řad tzv. fraktální dimenzi, což je v ideálním případě jedno číslo, popisující míru strukturovanosti a složitosti.

Spojením nástrojů fraktální geometrie, statistiky [5] a případně dalších nástrojů, jako je spektrální analýza, lze získat silný nástroj pro jednoznačný a objektivní popis naměřených dat a lze tak říci, že toto spojení obsahuje prvky synergie. Oddělená prezentace výsledků může být navíc zavádějící, protože oba nástroje popisují data jiným principem a výsledky často nelze přímo konfrontovat.

Fraktální dimenze však musí být správně použita a lze ji také použít jen na určitou škálu dat. Problematikou aplikace fraktální geometrie na data z průmyslové praxe a synergií nástrojů se zabývala práce [6] a následně je vydávána i monografie na toto téma [7]. Na přesnější a obecnější stanovení hranic užití a podmínek použití nástrojů fraktální geometrie je zaměřen projekt financovaný GAČR s názvem: *Meze a podmínky použitelnosti fraktální geometrie ve spojení se statistikou pro objektivní hodnocení průmyslových dat (402/08/P418)*. Cílem projektu je ověřit na širokém spektru laboratorních a průmyslových dat možnosti vyvinuté metodiky a stanovit její limitující faktory s důrazem na následnou aplikovatelnost využití výsledků v průmyslové praxi.

V úvodní etapě projektu byly analyzovány 4 vzorky (vzorek 1 – plazmový nástřík, vzorek 2 – jiskřený, vzorek 3 a 4 – tryskaný, obr. 1) a byla provedena dvě základní měření a jejich vyhodnocení:

- Měření profilu a drsnosti vzorků.
- Popis snímků z elektronového mikroskopu.

2 Fraktální geometrie

S využitím euklidovské geometrie lze jen komplikovaně, popř. vůbec není umožněno popsat složité útvary, jako jsou vady, drsnost povrchu, nehomogenní množiny bodů, či složité časové řady dat z výrobních procesů. Složitost těchto útvarů však může být významná jak pro jejich popis a kvantifikaci, tak i pro hlubší pochopení jejich vzniku.

Fraktální geometrie [1–4] je matematický nástroj pro popis složité strukturovaných objektů, jejichž charakter se nemění při zvětšení. Objekty, které lze popsat pomocí fraktální geometrie, se nazývají z geometrického hlediska fraktály.

Označení fraktál poprvé použil B. Mandelbrot [1]. Slovo fraktál použil pro všeobecné označení objektů, jejichž tvar je nezávislý na velikosti měřítka, pod kterým objekt pozorujeme. Znamená to tedy, že není důležité jaké je použito měřítko pro pozorovaný objekt, neboť „charakter struktury“ bude stejný nebo podobný pro různá zvětšení, či zmenšení (mluví se o tzv. měřítkové neměnnosti).

Fraktální dimenze, která je „charakteristickým číslem“, uvádí jak složitý je pozorovaný útvar. Nejčastěji se jedná o povrch, nebo strukturu tělesa, časovou řadu nebo množinu bodů. Fraktální dimenze vyjadřuje z geometrického hlediska složitost těchto objektů a popisuje tuto složitost pomocí jednoho čísla. Fraktální dimenze, v případě fraktálů, převyšuje jejich topologickou dimenzi, která je celočíselná (dimenze charakterizovaná bodem, úsečkou, trojúhelníkem a tetradrem), což je také jedna z definic fraktálů.

V reálném světě nelze fraktální dimenzi přímo spočítat a pak lze dimenzi jen odhadovat. K tomu slouží mnoho metod a záleží na tom, zda se jedná o množinu bodů, topologicky jednodimenzionální útvar (např. časová řada z výrobního procesu) nebo topologicky dvojdimenzionální útvar (např. snímek poruchy). V projektu je užíváno obvodové dimenze [1–4, 8], popsané níže a RS dimenze [2].

3 Metodika vyhodnocení profilu a drsnosti vzorků

Profil vzorků byl měřen zařízením Mitutoyo SV 2000, snímací hrot standardní s úhlem 60°, rozsah odchylky profilu 800 μm .

Celkem bylo provedeno 67 měření v místech zobrazených na obr. 1 (22 křivek profilu vzorku 1, 25 vzorku 2, po deseti vzorku 3 a 4). Profily se proměřovaly vodorovně, svisle a příčně.



Obrázek 1: Znárodnění míst, kde byly vzorky proměřeny: vzorek 1 – plazmový nástřik, vzorek 2 – jiskřený vzorek, vzorek 3 – tryskaný 1, vzorek 4 – tryskaný 2.

3.1 Použité metody pro vyhodnocení profilu a drsnosti vzorků

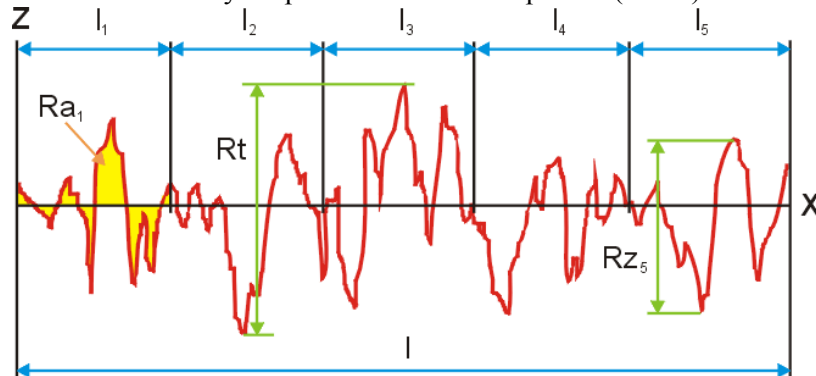
Popis změřeného profilu byl proveden pomocí softwaru vyvinutého v prostředí MATLAB, který umožňuje získání těchto parametrů:

- Parametry drsnosti: R_a , R_t , R_z , $R_z(\text{JIS})$, S_m .
- Statistické parametry: směrodatná odchylka křivky profilu, délka povrchu na 1 mm, počet výstupků, poměr křivky profilu ku křivce definované maximy a minimy.
- Parametry fraktální geometrie: obvodová dimenze, RS dimenze.

Ra – průměrná střední aritmetická úchylka profilu z 5 intervalů profilu (l_1 až l_5), graficky představuje žlutou plochu na obr. 2. Jedná se o nejpoužívanější parametr drsnosti, jehož význam je však často přeceňován.

Rt - maximální výška profilu. Je to výška mezi minimem profilové křivky a jejím maximem po celé délce profilu l (obr. 2).

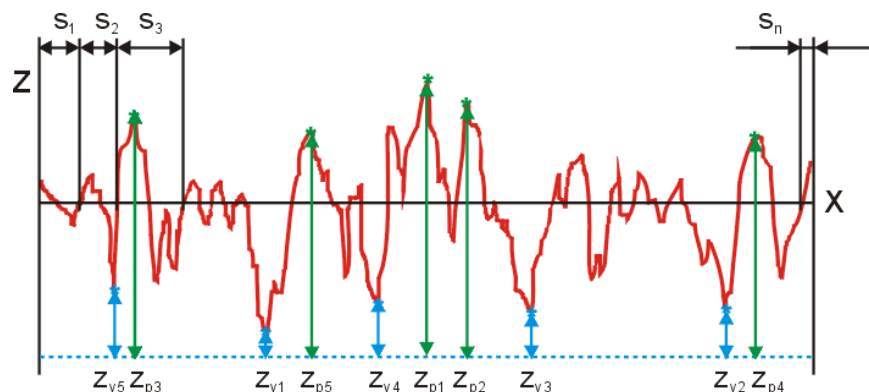
Rz - průměrná maximální výška profilu z 5 intervalů profilu (obr. 2).



Obrázek 2: Parametry Ra , Rt , Rz

Rz (JIS) – výška nerovnosti profilu z 10 bodů (z 5 nejvyšších výstupků z_{pi} a 5 nejhlubších prohlubní z_{vi} , obr. 3).

Sm (SM) - střední rozteč nerovnosti profilu je sumou vzdáleností mezi vrcholky, podělenou počtem vrcholků, které jsou definovány relativně ke střední čáře profilu ($s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ obr. 3). Vrcholky musí překročit střední čáru a potom se vrátit zpět.



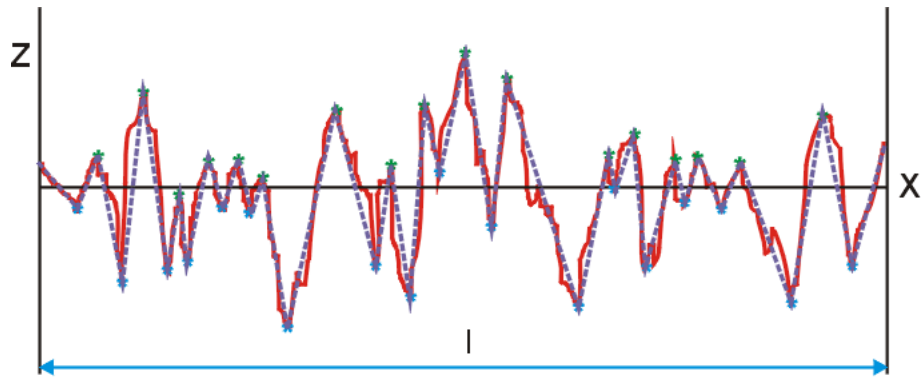
Obrázek 3: Parametry Rz (JIS) a Sm

Směrodatná odchylka křivky profilu – je běžným statistickým nástrojem, který popisuje míru variability křivky profilu.

Relativní délka – délka povrchu na 1 mm měřené délky. Je to poměr změřené délky křivky profilu nejmenším krokem měřidla (celková délka červené křivky profilu na obr. 2) a měřené délky profilu l (obr. 2). Krok měřidla (rovný vzorkovacímu intervalu drsnoměru) přístroje Mitutoyo SV 2000 byl $0,5 \mu\text{m}$.

Počet výstupků (Peaks) – počet výstupků na 1 mm. Je počítán počet lokálních vrcholů na celkové měřené délce (zelené body na obr. 4) a počet vrcholů je podělen celkovou délkou l (modrá čára na obr. 4).

Poměr křivky profilu ku křivce definované maximy a minimy (Poměr křivky extrémů) – poměr délky povrchu ku délce profilu, který je dán výstupky a prohlubněmi. Je to poměr změřené délky křivky profilu nejmenším krokem měřidla (celková délka červené křivky profilu na obr. 4) a měřené délky profilu, který je dán maximy a minimy (fialová čárkovaná čára na obr. 4)



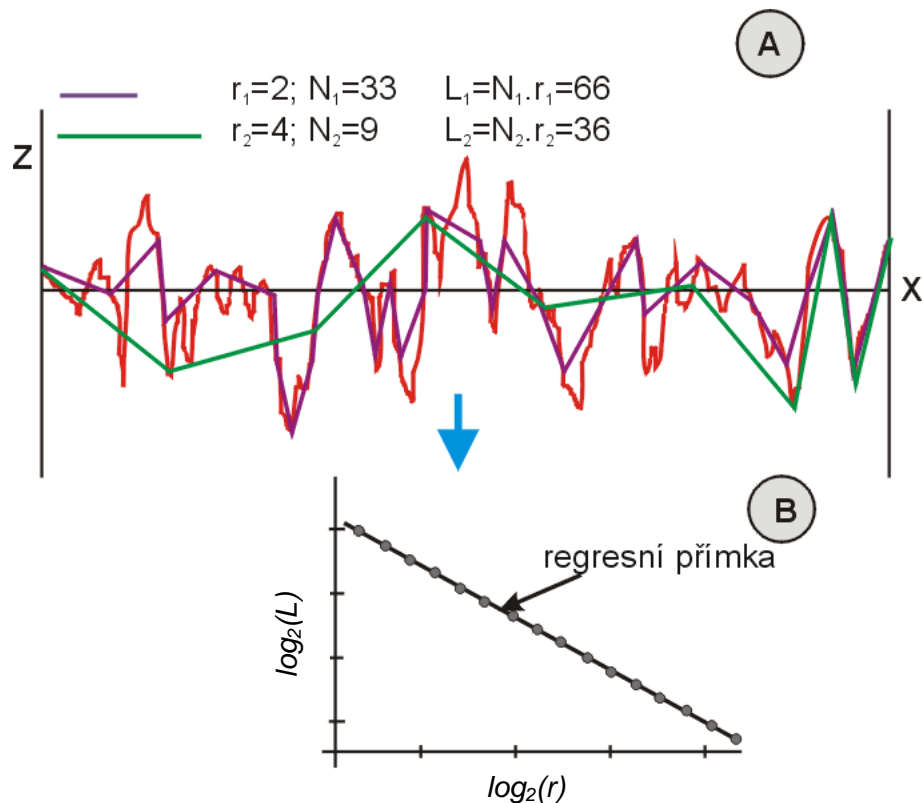
Počet výstupků * = 17

Obrázek 4: Počet výstupků a poměr křivky profilu ku křivce definované maximy a minimy

Obvodová dimenze ($D_{o,1000}$) [1–4, 8] – odhad fraktální dimenze křivky profilu pomocí obvodové metody je znázorněn na obr. 5. Tato metoda je založena na principu měření délky křivky profilu různě velkým krokem měřidla pomocí vztahu:

$$L_i = N_i \cdot r_i$$

kde r_i je délka kroku (měřítka), N_i je počet kroků r_i nutných k pokrytí křivky a L_i je naměřená délka křivky v i -tém kroku měření. Krok r_i se prodlužuje až po krok délky pokrývající celou křivku. Pro různě dlouhé kroky se počítá délka křivky L_i a pokud se jedná o *fraktální* strukturu, pak s prodlužováním kroku se délka křivky profilu zkracuje (obr. 5, A).



Obrázek 5: Výpočet obvodové dimenze

Tato závislost vyjádřená v logaritmech je v ideálním případě přímková ($\log_2 r$ a $\log_2 L$) a ze sklonu regresní přímky je vypočtena obvodová *dimenze* D_o podle vztahu:

$$D_o = 1 - \frac{\Delta \log L}{\Delta \log r}$$

Pokud je vynesena druhý logaritmus velikosti kroku $\log_2 r$ spolu s druhým logaritmem naměřené délky $\log_2 L$ do grafu, pak ze sklonu regresní přímky je vypočtena *obvodová dimenze* (obr. 5, B). *Obvodová dimenze* byla dále vynásobena 1000 tak, aby výsledky byly lépe zobrazeny a je dále značena D_{o1000} .

RS dimenze (D_{RS1000}) [2] – počítána jednou z metod pro odhad fraktálové dimenze tzv. *R/S metodou*. *R/S dimenze* popisuje stejně jako obvodová dimenze složitost křivky, ale používá jiného matematického aparátu. Nabývá hodnot od 1 do 2, ale zde je vynásobena číslem 1000 tak, aby výsledky byly zřetelné a je značena D_{RS1000} .

Parametry R_a , R_z , R_t jsou v [6, 7] označovány jako parametry amplitudy. Parametry S_m a *Počet výstupků* jsou parametry frekvence a *relativní délka*, *Poměr křivky extrémů*, *Obvodová dimenze* a *RS dimenze* jsou parametry složitosti křivky profilu.

3.2 Výsledky hodnocení profilu a drsnosti vzorků

Parametr R_a vcelku úspěšně dokáže ohodnotit relativně hladké povrchy (tab. 1) a potvrzuje to i porovnání vzorků 3 a 4, kde okem těžko postřehnutelné rozdíly v povrchu se projevily jiným průměrem R_a . Opět však do sebe zasahuje rozptyl jednotlivých naměřených hodnot (maxima a minima) parametrů.

Tabulka 1: Parametry drsnosti R_a a R_t získané přímo z drsnoměru

	Vzorek 1-plazm. nástřik			Vzorek 2-jiskřený			Vzorek 3 - tryskaný 1			Vzorek 4 - tryskaný 2		
	Min.	Prům.	Max.	Min.	Prům.	Max.	Min.	Prům.	Max.	Min.	Prům.	Max.
R_a	11.39	19.82	33.98	6.20	15.85	31.22	0.90	1.03	1.16	0.63	0.81	0.97
R_t	12.41	96.33	153.14	26.21	67.96	112.23	7.15	10.37	12.96	10.95	10.95	10.95

V tab. 2 je uveden souhrn srovnání průměrných hodnot těchto parametrů pro 4 uváděné vzorky a jejich rozptyl určený pomocí maxima a minima. Obr. 2 a 3 graficky zobrazuje stejné.

Jako vhodné parametry pro hodnocení těchto typů struktur se ukazují:

Počet výstupků – počet výstupků na 1 mm – parametr frekvence (i přesto že rozptyl parametru u vzorku 3 a 4 se mírně překrývá).

Poměr křivky profilu ku křivce definované maximy a minimy (Poměr křivky extrémů) – poměr délky povrchu ku délce profilu, který je dán výstupky a prohlubněmi – parametr složitosti.

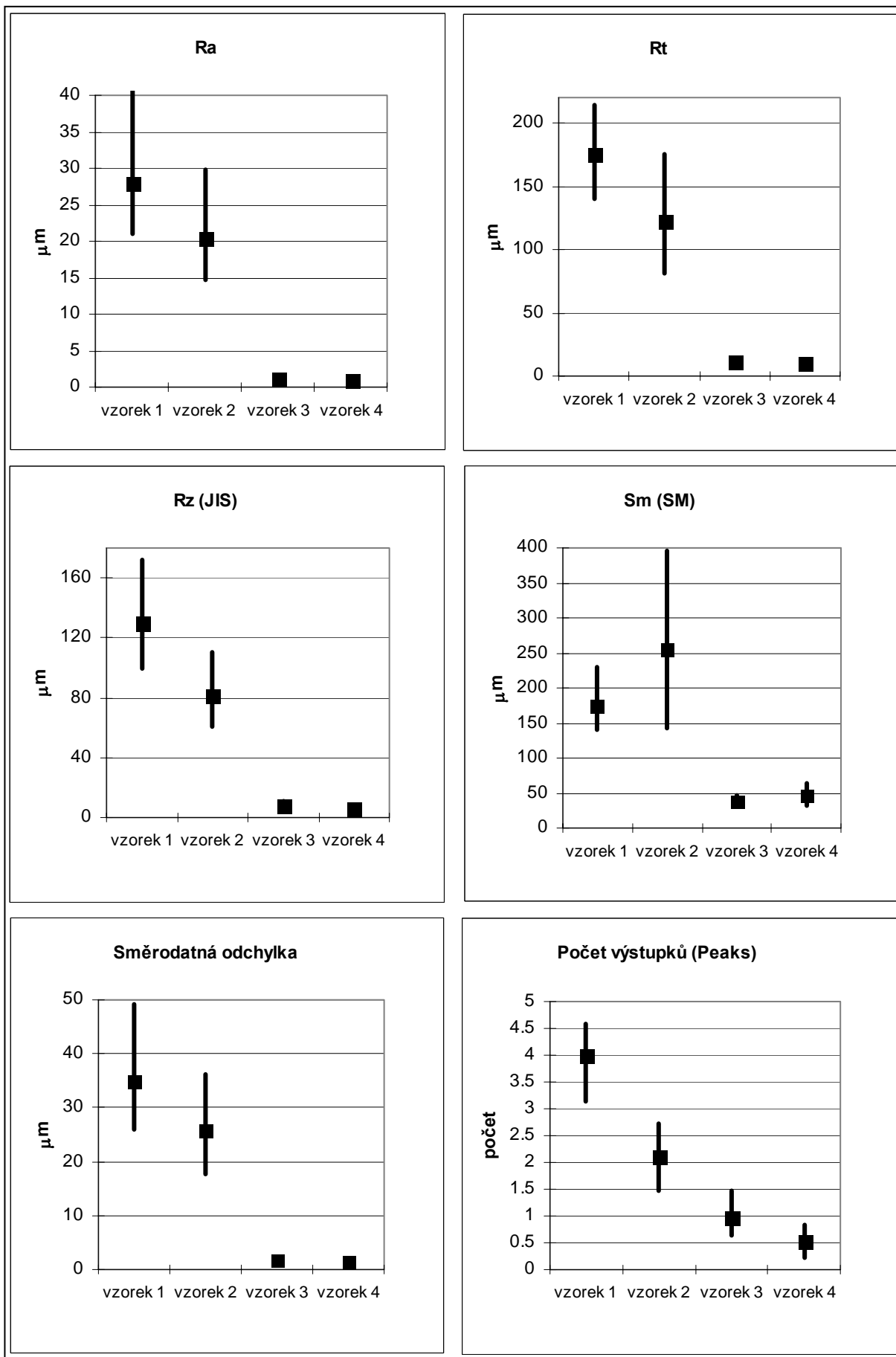
Relativní délka – délka povrchu na 1 mm měřené délky – parametr složitosti.

Obvodová dimenze – odhad fraktální dimenze křivky profilu pomocí obvodové metody (vynásobená hodnotou 1000) – parametr složitosti.

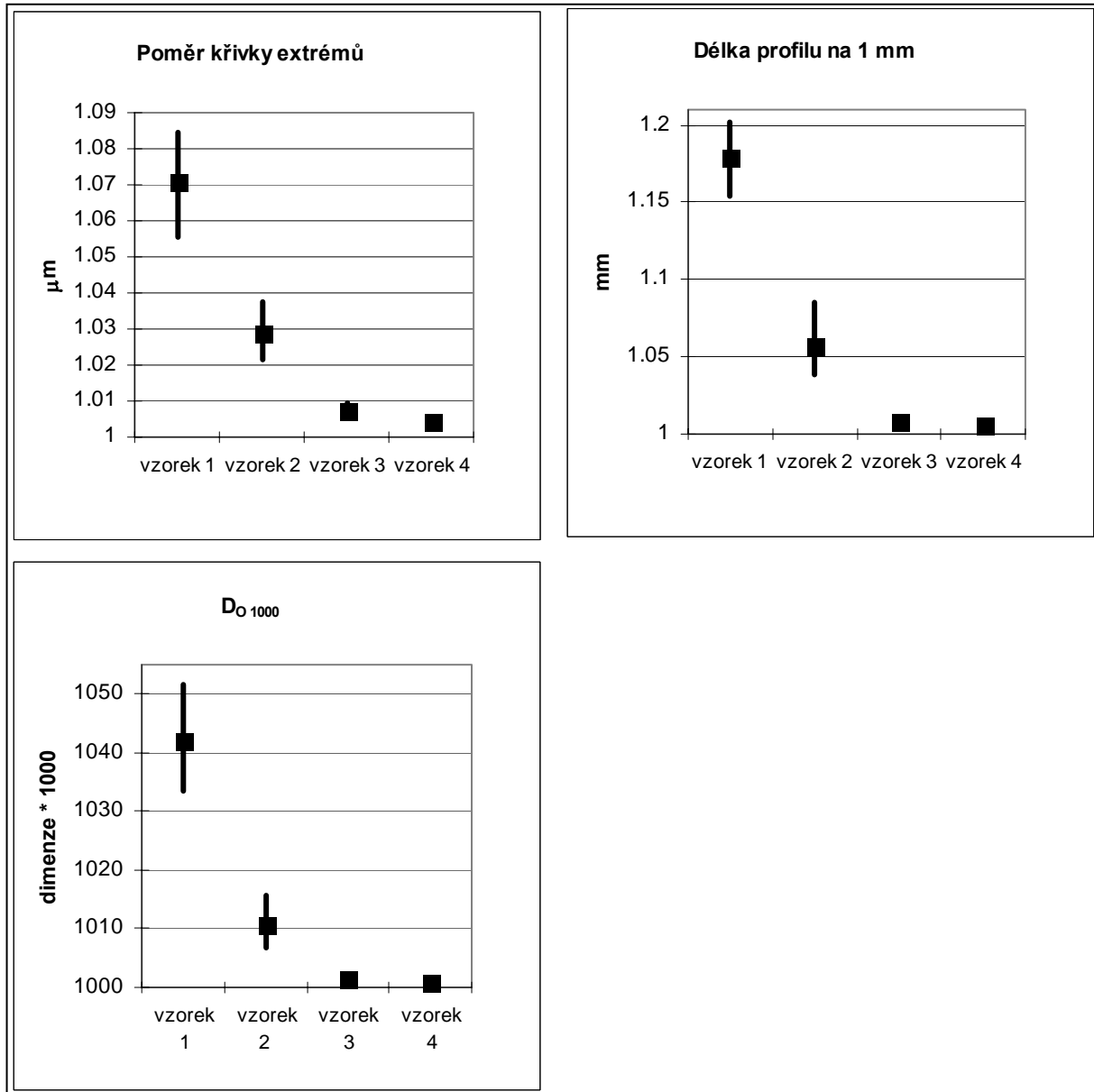
Počet výstupků (počet výstupků na 1 mm) nedokázal jednoznačně určit rozdíl mezi tryskaným vzorkem 3 a 4, ale protože se jedná o nevhodnější parametr frekvence, měl by se v analýze užívat. Vhodné je použít i jeden z parametrů amplitudy (R_a , R_z nebo R_t). Bylo by vhodné se držet parametru R_a nebo R_z (JIS).

Tabulka 2: Naměřené maximální, minimální a průměrné hodnoty parametrů popisujících drsnost, neuspořádanost a složitost profilové křivky (obdobně jako v [2]). Červeně jsou vyznačeny parametry, jejichž rozptyly hodnot jednotlivých vzorků do sebe nezasahují.

	Vzorek 1 - plaz. nástřik			Vzorek 2 - EDM Seko			Vzorek 3 - tryskání 1			Vzorek 4 - tryskání 2		
	Min.	Prům.	Max.	Min.	Prům.	Max.	Min.	Prům.	Max.	Min.	Prům.	Max.
Ra	21.12	28	40.7	14.66	20.46	29.84	0.96	1.16	1.44	0.72	1.01	1.37
Rt	140.16	174.83	213.68	81.44	122.87	175.73	7.91	12.00	14.57	6.68	10.05	13.21
Rz1	63.42	107.4	164.73	35.89	75.27	121.8	0.83	1.24	2.64	0.80	1.06	2.26
Rz2	72.92	117.53	188.26	41.07	87.55	122.93	0.92	1.12	1.52	0.61	1.04	1.80
Rz3	48.79	120.53	209.36	26.15	79.43	139.77	0.83	1.18	1.58	0.62	0.91	1.51
Rz4	78.75	122.18	186.55	34.31	73.43	122.78	0.77	1.22	1.65	0.65	0.98	1.58
Rz5	78.49	112.94	177.34	28.06	72.64	129.26	0.65	1.06	1.64	0.67	1.08	1.73
Rz	98.44	116.12	148.74	53.57	77.66	105.81	5.79	7.86	9.72	4.98	6.13	7.42
Rz (JIS)	99.33	130.48	172.52	60.19	81.77	110.28	5.79	8.27	10.80	4.98	6.13	7.42
Sm (SM)	139.86	174.2	229.55	142.73	255.63	395.49	32.13	38.38	46.98	31.84	45.92	64.57
Směrodatná odchylka	26.04	34.9	49.28	17.61	25.72	36.09	1.21	1.59	1.90	0.96	1.35	1.73
Počet výstupků (Peaks)	3.13	4.01	4.59	1.46	2.1	2.71	0.63	0.96	1.46	0.21	0.52	0.83
Poměr křivky extrémů	1.0557	1.0708	1.0843	1.0215	1.0289	1.0377	1.0065	1.0076	1.0095	1.0041	1.0047	1.0056
Délka profilu na 1 mm	1.1538	1.1791	1.2024	1.0387	1.0568	1.0854	1.0073	1.0085	1.0108	1.0047	1.0054	1.0063
D _{o 1000}	1033.62	1042.24	1051.53	1006.82	1010.8	1015.52	1001.33	1001.56	1002.06	1000.80	1000.97	1001.16
D _{RS 1000}	1462.91	1524.15	1592.41	1285.02	1385.99	1487.28	1553.57	1583.16	1638.63	1329.05	1424.30	1556.40



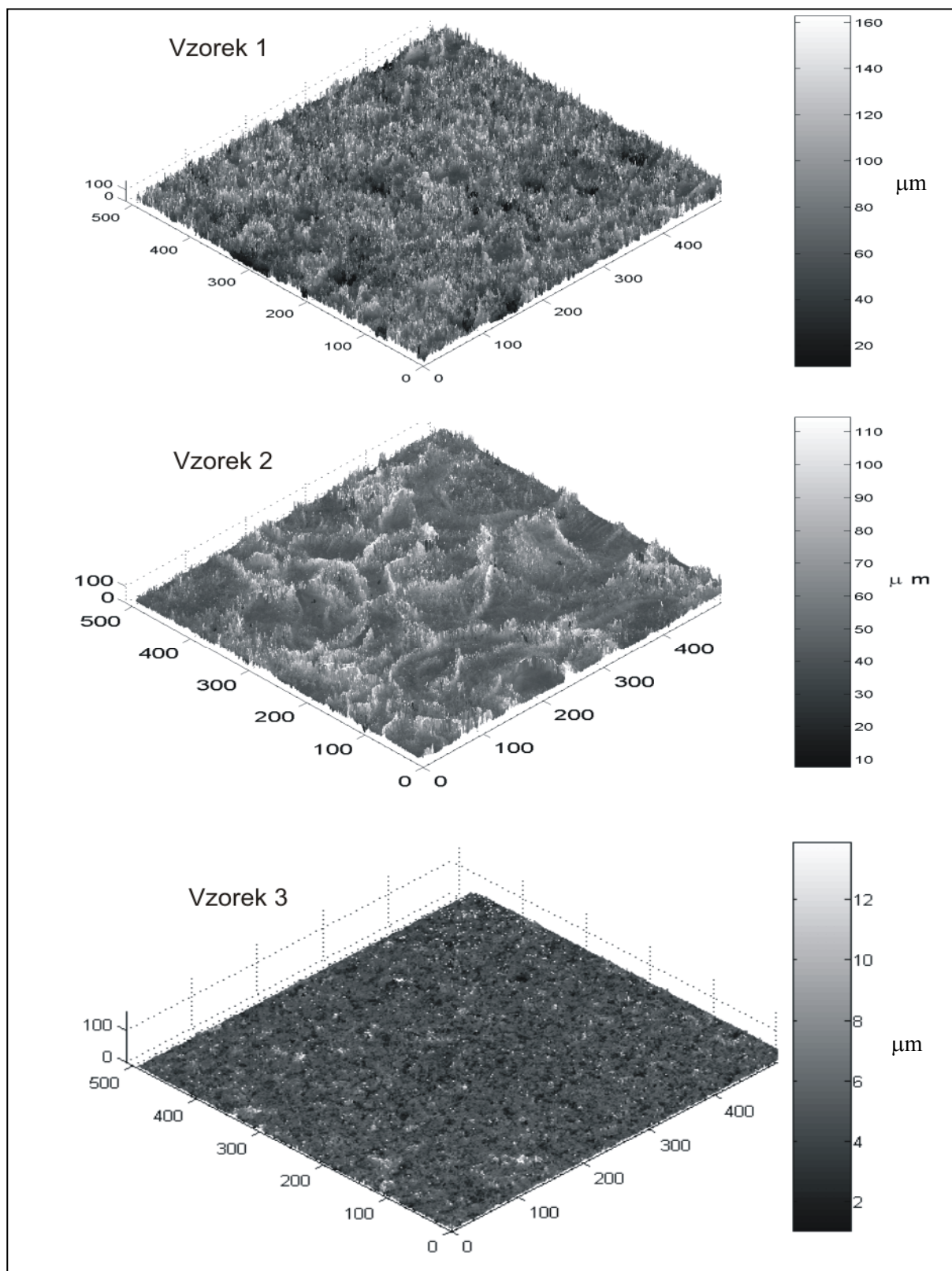
Obrázek 6: Grafické zobrazení průměru a rozptylu vybraných parametrů - 1



Obrázek 7: Grafické zobrazení průměru a rozptylu vybraných parametrů - 2

4 Zpracování digitálních snímků

V této první fázi výzkumu bylo analyzováno celkem 10 snímků z elektronového mikroskopu tří vzorků z pozic označených na obr. 1 červenými číslicemi. Obr. 8 ukazuje snímky vzorků z pozice 1 v 3D zobrazení.

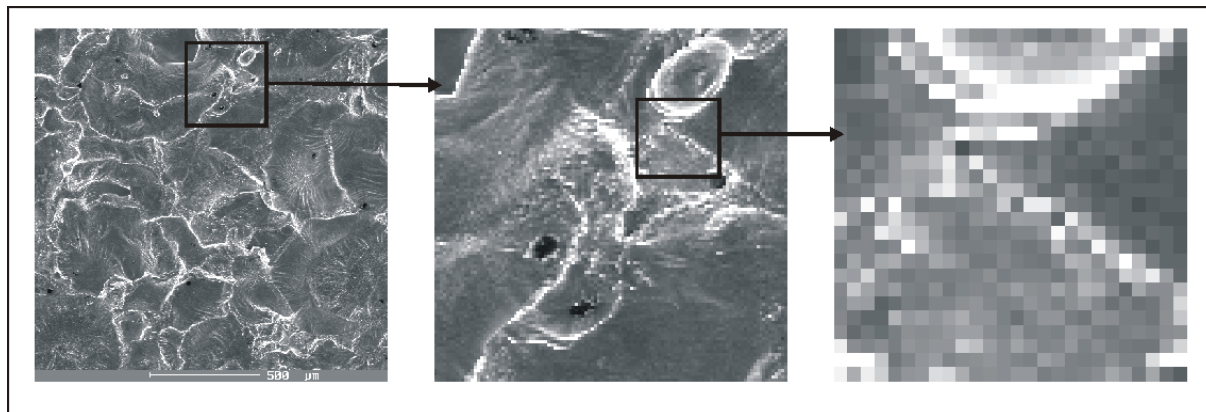


Obrázek 8: 3D zobrazení vzorků s šedivou škálou představující výšku profilu:
vzorek 1– plazmový nástřik, vzorek 2–jiskřený, vzorek 3 - tryskaný

4.1 Použité metody pro popis snímků

Pro analýzu obrázků byly použity metody popisující statisticky histogram a metody umožňující popis složitosti struktury snímků:

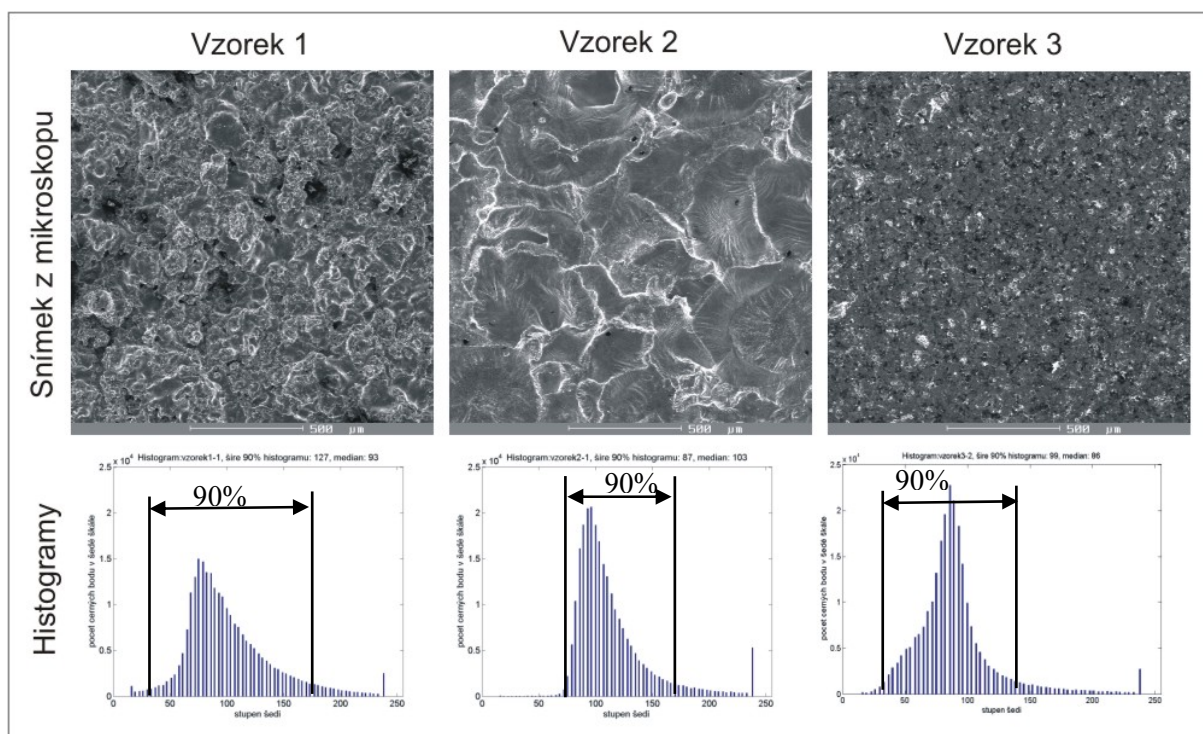
- Statistický popis histogramu.
- Počet sousedních pixelů číselné hodnoty 0 (černé pixely).
- Fraktální geometrie: Mřížková metoda.



Obrázek 9: Zvětšení části obrázku až po zřetelnou matici pixelů, vzorek 2 – jiskřený

Nasnímané datové obrazy jsou ukládány a dále zpracovávány v šedé škále odstínů šedi ve formátu BMP. V tomto formátu a barevné škále je datový obraz reprezentován jednou maticí. Čísla v matici jsou tzv. pixely, které představují jednotlivé body, z nichž je obrázek složen a jejichž číselná hodnota odpovídá stupni šedi (obr. 9). Pixely dosahují hodnot z intervalu 0 (černá) až 255 (bílá).

Na obr. 10 jsou zobrazeny histogramy snímků vzorků. Osa x představuje číselné hodnoty pixelů od 0 (černá barva) po 255 (bílá) a osa y počet pixelů dané hodnoty v obrázku. Jedna z vhodných analýz, která popisuje histogram jedním číslem, je *šíře 90% všech hodnot histogramu* od průměrné hodnoty obrázku. Šíře vlastně popisuje, v jak širokém intervalu odstínů šedi leží 90% všech pixelů matice digitálního snímku. Histogram je možné hodnotit i pomocí jiných nástrojů statistiky,

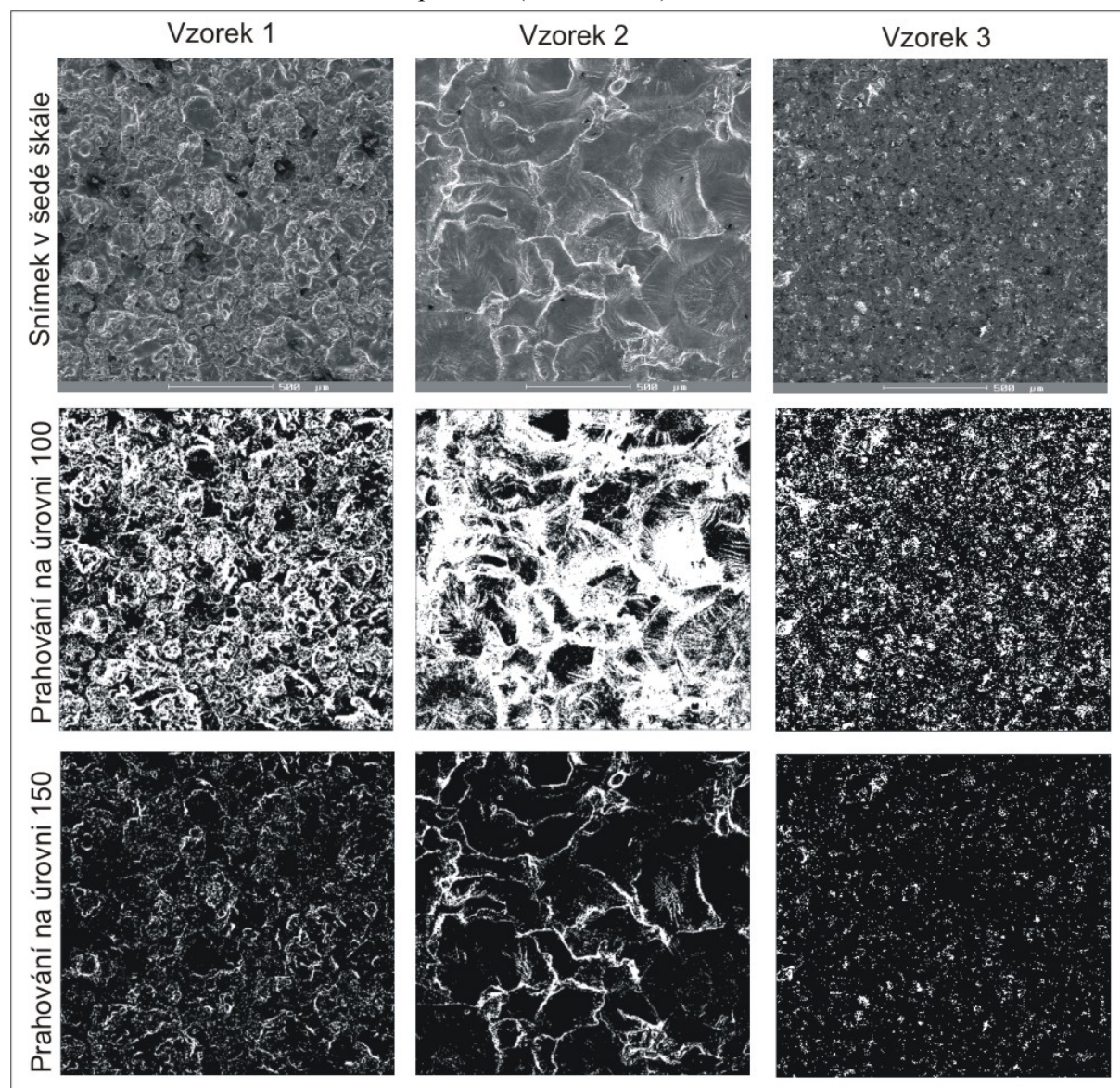


Obrázek 10: Histogramy snímků vzorků s vyznačením šíře 90% všech hodnot histogramu

jako je průměr, medián, modus, rozpětí, a další. Problém je však s různou úrovní kontrastu a jasů jednotlivých snímků z elektronového mikroskopu, které výsledky znehodnocují.

Metody *počtu sousedních pixelů číselné hodnoty 0* a *mřížková metoda* používají při analýze základního nástroje obrazové analýzy tzv. *prahování* [6, 7]. Je založeno na zvolení vhodného prahu a zavedení jednoduchého pravidla. Pokud je zvolena prahová hodnota na úrovni 100 (obr. 11 uprostřed), pak všechny vyšší hodnoty šedi budou reprezentovány barvou bílou (hodnotou 1) a všechny nižší či rovné budou reprezentovány barvou černou (hodnotou 0). Je tak získán binární obraz, který je tvořen pixely nabývajícími pouze hodnot 0 (černá) a 1 (bílá). Jak je vidět ze snímků po prahování, je důležitá volba správného prahu k zviditelnění struktury.

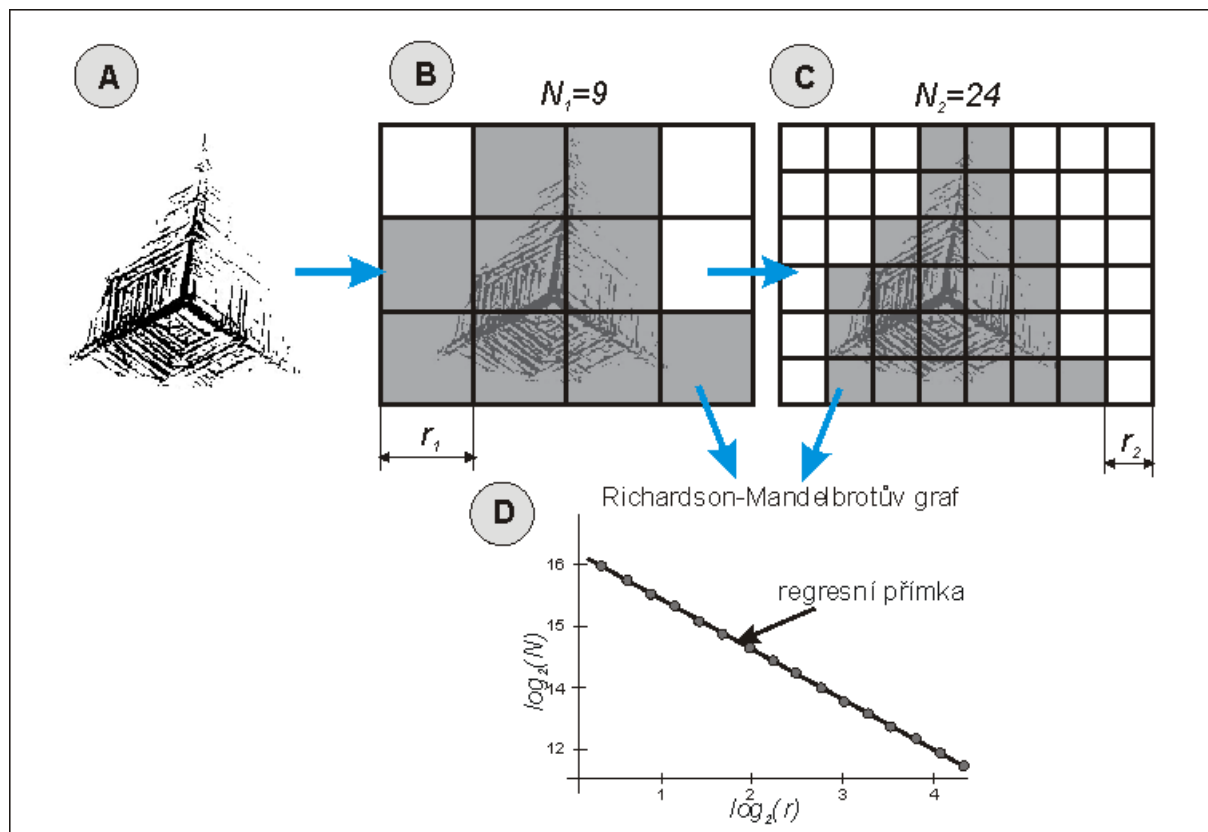
Při užití metody *počtu sousedních pixelů číselné hodnoty 0* [6, 7], jsou v binárním obrazu hledány pixely, které mají 8 respektive 7 černých pixelů za sousedy – černí sousedé leží okolo daného pixelu. Je tak počítáno vlastně procento souvislé černé plochy na binárním snímku. Méně strukturovaný snímek bude mít vyšší procento souvislé černé plochy než více strukturovaný. Výsledkem je jedno číslo pro binární snímek. Tato analýza je provedena pro 256 prahů (od 0 do 255) – 256 binárních snímků – a získá se spektrum (obr. 13 A, B).



Obrázek 11: Práhování snímků na úrovni 100 a 150

Fraktální geometrie používá často pro popis snímků tzv. *mřížkovou metodu*, která popíše strukturu pomocí jednoho čísla, tzv. *box dimenze (mřížkové dimenze) D_{BD}* [1-4, 6, 7]. Na binární snímek (obr. 12 A) složený je pokládána mřížka, kterou tvoří tzv. boxy – tedy čtverečky. Čtverečky mají velikost strany r . V prvním kroku je počítán počet čtverečků, které pokrývají třeba jen nepatrně

obrázek, který je tvořen černými body (obr. 12 B). Velikost strany $r_1 = 4$ a počet čtverečků pokrývajících obrázek $N_1 = 9$ je zaznamenán. V dalším kroku je velikost strany čtverečku snížena na polovinu $r_2 = 2$ a opět je počítán jejich počet, který pokrývá obrázek $N_2 = 24$ (obr. 12 C). V dalších krocích je pokrývání obrázku mřížkou a snižování velikosti strany čtverečků v mřížce opakováno. Do Richardson - Mandelbrotova grafu je pak vynášena závislost mezi druhým logaritmem velikosti hrany boxu r a druhým logaritmem počtu pokrývajících boxů N , obr. 12 D. Ze sklonu regresní přímky je pak vypočítána *box dimenze* snímku. Opět se jedná o jedno číslo pro binární snímek. Více strukturovaný („chaotičtější“) snímek bude mít větší sklon regresní přímky a tedy i vyšší *box dimenzi* než snímek méně strukturovaný.



Obrázek 12: Mřížková metoda: pokrývání binárního obrazu čtverci strany r , výpočet „plných boxů“ ležících na struktuře N a Richardson – Mandelbrotův graf

Pro optimální popis všech typů struktur je použito tzv. *fraktálního spektra* (obr. 13 C) [9], tedy analýza je provedena pro 256 binárních snímků vzniklých prahováním. Do *fraktálového spektra* je vynášena jedno-číselná hodnota *box dimenze* pro každý práh. Výsledkem je pak křivka, která uvádí změnu *box dimenze* se změnou prahu. Pro tuto analýzu je použito software HarFa [9]. Porovnáním křivek několika studovaných struktur ve *fraktální spektru* lze tak najít optimální práh s nejvyšším rozdílem fraktální dimenze a optimální metodu výpočtu dimenze. Pro analýzu většího souboru dat je pak vhodné použít pouze jeden práh.

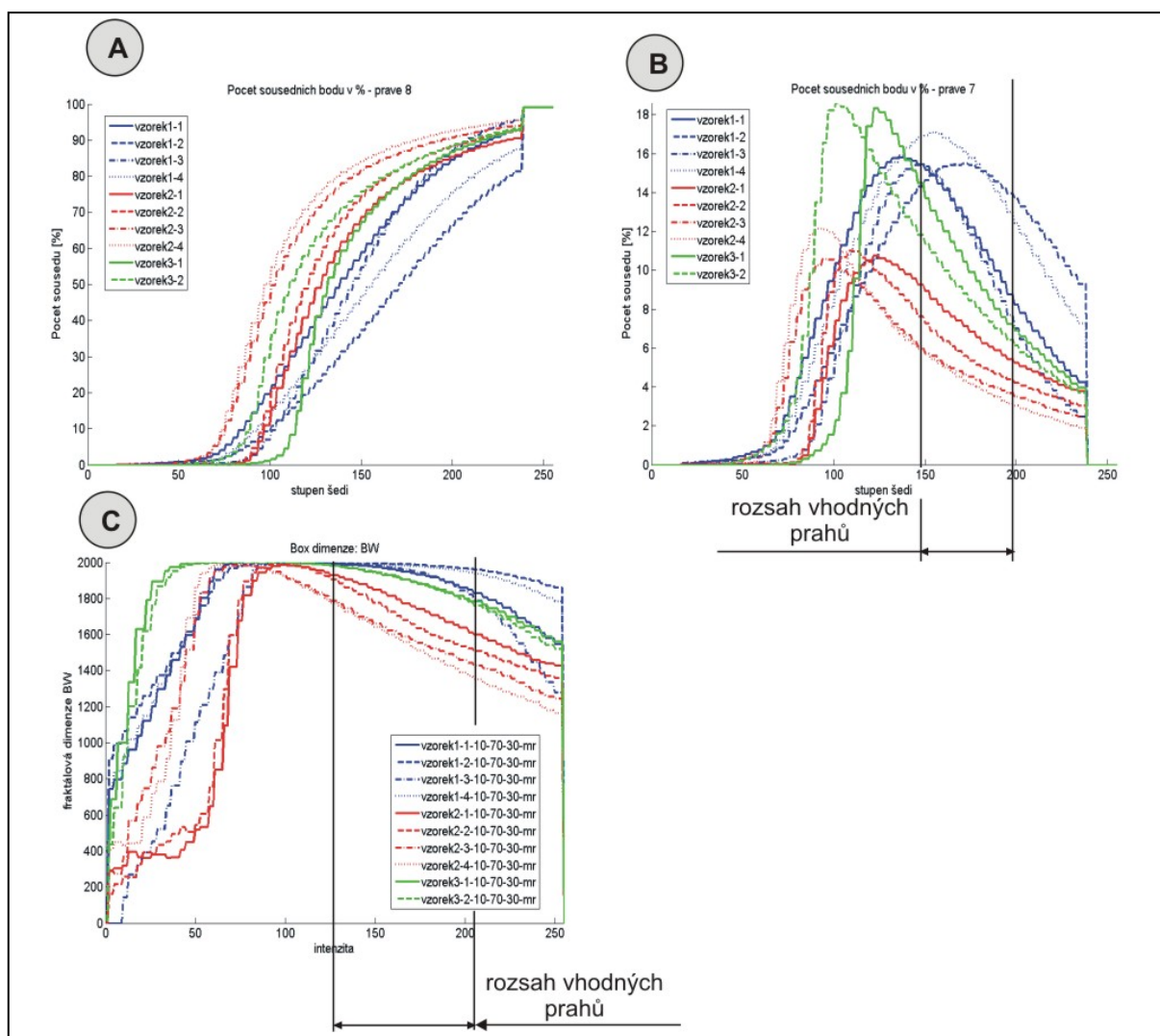
4.2 Výsledky zpracování digitálních snímků

Na obr. 13 jsou spektra *počtu sousedních pixelů číselné hodnoty 0* (právě 8 sousedů a právě 7 sousedů) a *box dimenze* s vyznačením rozpětím prahů, ve kterých je jednoznačný rozdíl mezi charakterem struktury obou snímků. Analýza *počtu sousedních pixelů číselné hodnoty 0* se neukázala jako vhodná přesto, že ji lze nastavit tak, aby rozdíl mezi snímky byl jednoznačný, obr. 13 B.

Podle výsledků fraktální geometrie má výsledná *box dimenze* vzrůstající složitost struktury či strukturovanosti povrchu od vzorku 2 – jiskřený vzorek, přes tryskaný vzorek 3 až po vzorek 1 – plazmový nástřik. Vyšší hodnoty *šíře 90% všech hodnot histogramu* tento fakt potvrzují. Ostatní

analýzy nebyly schopny jednoznačně odlišit tři analyzované vzorky a přiřadit jim vyšší nebo nižší hodnoty parametrů v závislosti na charakteru povrchu.

Při analýze snímků nastává dále problém s jednoznačným nastavením stupně jasu a kontrastu, který může výsledky významně ovlivnit. Jas a kontrast se mění při snímání vzorků a je kladen vysoký nárok na stejné podmínky při snímání.



Obrázek 13: A – počet pixelů s 8 sousedními pixely stejné velikosti, B – počet pixelů se 7 sousedními pixely stejné velikosti, C – fraktální spektrum obvodové dimenze – získáno z mřížkové metody (fraktální geometrie)

5 Celkové shrnutí

Z hlediska parametrů drsnosti, je jednoznačně nejhladší vzorek 3 a 4, tryskaný. Přestože vzorky 3 a 4 jsou si velice podobné, lze je jednoznačně odlišit pomocí analýz: *poměru křivky extrémů, délky profilu na 1 mm a obvodové dimenze $D_{0,1000}$* .

V rámci úvodní fáze výzkumu byly ověřeny možnosti zpracování tohoto typu dat a byly stanoveny základní podmínky pro analýzu širšího výběru vzorků. Na základě těchto znalostí byly vyrobeny vzorky primárně určené pro tento výzkum. Vedle zmíněných nedestruktivních analýz je používáno i metalografických výbrusů, které jsou následně analyzovány nástroji vyvinutými v prostředí MATLAB [8].

Tabulka 3: Naměřené maximální, minimální a průměrné hodnoty parametrů popisujících strukturu snímků. Červeně jsou vyznačeny parametry, jejichž rozptyly hodnot jednotlivých vzorků do sebe nezasahují.

	vzorek 1-plazmový nástř.			vzorek 2-EDM Seko			vzorek 3-tryskaný		
	Min.	Prům.	Max.	Min.	Prům.	Max.	Min.	Prům.	Max.
Ořezáním histogramu na úrovni 5%	99	131.25	160	78	83.5	87	80	89.5	99
Počet sousedních pixelů číselné hodnoty 0 (práh 140, právě 8)	31.4	42.0	51.7	61.8	72.3	81.1	59.3	65.4	71.4
Počet sousedních pixelů číselné hodnoty 0 (práh 160, právě 7)	14.1	15.1	16.8	5.0	6.1	7.9	10.0	11.0	12.0
Box dimenze $D_{BD 1000}$ (práh 190)	1961.9	1978.5	1991.9	1599.4	1690.5	1813.9	1920.4	1924.2	1928.0

Poděkování: práce vznikla v rámci projektu GA CR 402/08/P418, finančně podporovaným Grantovou agenturou České republiky.

Literatura

- [1] MANDELBROT, B. B. The fractal geometry of nature. New York: W. H. Freeman and Co., 1982.
- [2] EVERTSZ, C.J.G., PEITGEN, H.O. and VOSS, R.F. Fractal Geometry and Analysis. Singapore: World Scientific Publishing Co.Pte. Ltd., 1996. ISBN: 9810224346.
- [3] ZELINKA, I., VČELAR, F., ČANDÍK, M., Fraktální geometrie – principy a aplikace. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-193-4.
- [4] PEITGEN, H.O., JUERGENS, H. and SAUPE, D. Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. New York; Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. ISBN: 0387979034.
- [5] CYHELSKÝ, L., KAŇOKOVÁ, J. a NOVÁK, I. Teorie statistiky. Praha: SNTL, 1986. ISBN: 04-331-86.
- [6] HOTAŘ, V. Hodnocení průmyslových dat pomocí fraktálové geometrie. [Disertační práce] Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005.
- [7] HOTAŘ, V. Metodika popisu průmyslových dat pomocí fraktální geometrie. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. [v tisku]
- [8] HOTAŘ, V., HOTAŘ, A. Surface Profile Evaluation by Fractal Dimension and Statistic Tools Using Matlab. In proceedings: Technical Computing Prague 2007. [CD + online: <http://www.humusoft.cz/akce/matlab07/sbor07.htm>]. Praha: Humusoft, 2007, 6 p. ISBN: 978-80-7080-658-6
- [9] ZMEŠKAL, O., NEŽÁDAL, M., BUCHNÍČEK, M. AND SEDLÁK, O. HarFA and HARFA: E-JOURNAL [online]. Brno: Ústav fyzikální a spotřební chemie, 2002 [cit. 16. října 2008]. Dostupné na WWW: < <http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/> >.

Vlastimil Hotař

Technická univerzita v Liberci, Katedra sklářských strojů a robotiky, Studentská 2, 461 17 Liberec, tel: 485 354 129, fax: 485 354 157, e-mail: vlastimil.hotar@tul.cz