Mendelova univerzita v Brně
Lesnická a dřevařská fakulta
Ústav základního zpracování dřeva

KVALITA ŘEZNÉ SPÁRY PŘI DĚLENÍ UMĚLÉHO KAMENE

Diplomová práce

2015/2016 Bc. Lenka Jálová

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Prohlašuji, že jsem práci: **Kvalita řezné spáry při dělení umělého kamene** zpracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědoma, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne 8. dubna 2016 ……...

Bc. Lenka Jálová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu své diplomové práce, panu doc. Ing. Zdeňku Kopeckému, CSc., za jeho odborné vedení, ochotu, vstřícnost a zejména za mnohé cenné a přínosné rady a připomínky. Dále bych ráda poděkovala společnosti Cetecho s.r.o. za poskytnutí zkušebního materiálu a řadu cenných informací a zkušeností, stejně jako společnosti AWAC, spol. s r.o. za možnost zpracování zkušebních vzorků vodním paprskem. Poděkování také patří Ústavu základního zpracování dřeva a Ústavu hospodářské úpravy lesů a aplikované geoinformatiky za možnost nařezat vzorky v dřevařských dílnách, a následně je vyhodnotit v biometrické laboratoři. V neposlední řadě patří poděkování rodině, přátelům a zkrátka všem, se kterými jsem při zpracování této diplomové práce přišla do styku, za jejich pomoc, ochotu, oporu a trpělivost poradit a pomoct.

ABSTRAKT

Autor práce: Bc. Lenka Jálová

Název bakalářské práce: Kvalita řezné spáry při dělení umělého kamene

Práce se zaměřuje na charakteristiku, vlastnosti a možnosti použití umělého kamene kategorie Solid surface v nábytkářské výrobě. Mimo jiné se zabývá procesem obrábění, pilovými kotouči, vysokotlakým vodním paprskem a metodami pro vyhodnocování kvality řezné spáry. Hlavním cílem je posouzení jakosti řezné spáry pro rozdílné technologie dělení a různé materiály umělého kamene Solid surface. V neposlední řadě se práce zaměřuje na vyhodnocení významu geometrie pilových kotoučů v závislosti na kvalitě obrobeného povrchu.

Klíčová slova: umělý kámen, pilový kotouč, řezání, kvalita řezné spáry, vlnitost, vodní paprsek

ABSTRACT

Author's name: Bc. Lenka Jálová

Title of bachelor thesis: The quality of the kerf at cutting of artificial stone

The work is focused on the characteristic, properties and uses of artificial stone (category Solid surface) in furniture manufacturing. Beside other things, work deals with the process of machining, circular saw blades, water jet machining and methods for evaluating the kerf quality. The main goal is to assess the kerf quality for both different technologies of cutting and different Solid surface materials. Finally, the work is focused on assessing the significance of the circular saw blades geometry and their impact on the quality of machined surface.

Key words: artificial stone, circular saw blade, cutting, kerf quality, waviness, water jet

OBSAH

1 ÚVOD 8
2 CÍL PRÁCE 9
3 UMĚLÝ KÁMEN 10
3.1 Vlastnosti 11
3.1.1 Quartz surface 12
3.1.2 Solid surface 13
3.2 Technologické operace při zpracování Solid surface 19
3.2.1 Formátování 20
3.2.2 Frézování 20
3.2.3 Broušení 21
3.2.4 Soustružení a vrtání 22
3.2.5 Tvarování za pomoci tepla (thermoforming) 22
3.2.6 Lepení 24
3.3 Použití Solid surface v nábytkářském průmyslu 25
4 OBRÁBĚNÍ PILOVÝM KOTOUČEM 30
4.1 Pilové kotouče 31
4.1.1 Dělení na celistvé a pájené pilové kotouče 32
4.1.2 Dělení podle průměru a tvaru pilového kotouče 33
4.1.3 Dělení podle úpravy řezného zubu 35
4.2 Geometrie pilových kotoučů 36
4.3 Úpravy těla pilového kotouče 38
4.3.1 Úprava předpětím 38
4.3.2 Odhlučňovací drážky 38
4.3.3 Měděné nýty 39
4.3.4 Otvory v těle pilového kotouče 39
4.4 Řezání pilovými kotouči 39
4.4.1 Upínání pilových kotoučů 40
4.4.2 Rozvírací klíny 41
4.4.3 Kinematika obrábění 41
4.4.4 Jakost řezné spáry 42
4.4.5 Vibrace pilových kotoučů 43
4.5 Proces otupování břitu 44
4.5.1 Trvanlivost a živostnost břitu 45
5 OBRÁBĚNÍ VYSOKOTLAKÝM VODNÍM PAPRSKEM 47

5.1 Výhody a nevýhody obrábění vysokotlakým vodním paprskem 48
5.2 Čistý vysokotlaký vodní paprsek 49
5.3 Vysokotlaký vodní paprsek s příměsí abraziva 50
6 METODY HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU 53
6.1 Základní pojmy struktury povrchu 53
6.2 Kvalitativní metody hodnocení kvality povrchu 59
6.2.1 Vizuální metody 59
6.2.2 Srovnávací metody 59
6.3 Kvantitativní metody hodnocení kvality povrchu 60
6.3.1 Optické metody 61
6.3.1.1 Bodová měření 62
6.3.1.2 Profilová měření 63
6.3.1.3 Plošná měření 63
6.3.2 Dotykové metody 69
6.3.2.1 Profilová měření 71
6.3.2.2 Plošná profilová měření 75
6.3.3 Jiné metody 75
7 METODIKA PRÁCE 78
7.1 Materiál 80
7.2 Strojové a přístrojové vybavení 80
7.3 Použité pilové kotouče 88
8 VÝSLEDKY 92
8.1 Statická házivost a vibrace v daných otáčkách 92
8.2 Vyhodnocení vlivu použitých technologií na kvalitu řezné spáry 95
8.3 Srovnání hloubky vyštípaní horní hrany dělených materiálů 98
8.4 Srovnání kvality řezných spár z hlediska použitých materiálů 100
8.5 Vyhodnocení vlivu použitých technologií z hlediska ekonomie 102
9 DISKUSE 104
10 ZÁVĚR 107
11 SUMMARY 108
12 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 109
13 SEZNAM LITERATURY 112
14 SEZNAM OBRÁZKŮ 118
15 SEZNAM TABULEK 122
16 PŘÍLOHY 123

1 ÚVOD

Umělý kámen kategorie Solid surface je moderní materiál přinášející nové možnosti v nábytkářské výrobě, a to především díky jeho jedinečným vlastnostem, možnostem tvarování a spojování tzv. „bezespárovou“ technologií, kdy dochází ke vzniku neviditelného spoje. Aby tohoto spoje bylo docíleno, musí být lepené povrchy vysoké kvality z důvodu použití speciálních lepidel naleptávajících spojovaný materiál. Pro tento účel je nezbytné dělit umělý kámen pomocí vhodné technologie a nástroje.

Tato diplomová práce vznikla z důvodu absence odborné literatury zabývající se kvalitou řezných spár umělého kamene při různých metodách dělení, stejně jako z důvodu absence literatury zabývající se umělým kamenem jako takovým.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce je posoudit kvalitu řezné spáry při dělení rozdílných obchodních značek a dekorů umělého kamene, a to odlišnými metodami obrábění – formátovací pila a vysokotlaký vodní paprsek s příměsí abraziva. Jako podklad pro objektivní hodnocení jsou referenční vzorky obrobené speciálním pilovým kotoučem společnosti Cetecho s.r.o., která se zabývá zpracováním umělého kamene. Pro správné vyhodnocení je nutná analýza složení a fyzikálně-mechanických vlastností umělého kamene, samotného procesu dělení a vhodné metody hodnocení kvality řezné spáry.

Cílem experimentální části je posoudit zvolené technologie obrábění a vliv děleného materiálu z hlediska výsledné kvality řezné spáry včetně ekonomických aspektů. Záměrem je také najít vhodnou geometrii pilového kotouče pro dělení umělého kamene, která by kvalitativně předčila referenční vzorky řezané pomocí pilového kotouče se zakázkově broušenou geometrií pilových zubů u společnosti Cetecho s.r.o.

3 UMĚLÝ KÁMEN

Umělý kámen je moderní materiál používaná v nábytkářské výrobě (dílce kuchyňských linek, koupelen apod.) a má výborné užitné a estetické vlastnosti. Je vyráběn syntetickou cestou za přítomnosti většího či menšího množství přírodního kamene. Jeho povrch nejčastěji imituje přírodní kámen a současně také nabízí lepší vlastnosti, kdy se jedná především o jeho homogenní neporézní strukturu, nenasákavost, nižší hmotnost či větší výtěžnost. K dalším přednostem tohoto materiálu patří jeho velká barevná stálost, díky čemuž je možné ho aplikovat na více zařizovacích předmětů nezávisle na času pořízení. S tím také souvisí široká škála dekorů, kdy je možné použít plné barvy doplněné o zrna imitující kámen přírodní, či designerské atypické dekory. Atypické dekory jsou ovšem problematičtější z hlediska návaznosti kresby, kdy v případě Solid surface většinou následně nelze dosáhnout vizuálního dojmu bezespárého materiálu. To platí i pro dekory vyrobené zakázkově, které jsou současně mnohem dražší a často slouží pouze k dekoračním účelům. Samotný pojem umělý kámen jako takový v sobě skrývá řadu různých materiálů. Tato diplomová práce se ovšem primárně zaměřuje na umělý kámen kategorií Solid surface a Quartz surface, které nacházejí v nábytkářském průmyslu uplatnění nejčastěji (Závacký, 2015).

V Tab. 1 je uvedeno srovnání vlastností dvou typů umělého kamene s klasicky používaným vysokotlakým laminátem (HPL – High Pressure Laminates) na kuchyňské pracovní desky (Umělý kámen.cz, 2011).

Tab. 1 Srovnání vlastností materiálů používaných na pracovní desky (Umělý kámen.cz, 2011)

Vlastnosti materiálů používaných na pracovní desky	**Solid surface**	**Quartz surface**	**HPL**
Provedení spojů/spár	neviditelné	viditelné	viditelné
Odolnost proti vrypu (257 N/mm^2)	ano	ano	ne
Opravitelnost (do původního stavu)	ano	ne	ne
Tvarovatelnost	ano	ne	ne
Prosvítitelnost	ano*	ne	ne
Stálost barev	ano	ano	ano
Odolnost proti ovocným šťávám	ano	ano	ano
Nízké nároky na údržbu	ano	ano	ne
Flexibilita designu	ano	ne	ne
Dlouhověkost	ano	ano	ne

**intenzita závisí na zvoleném dekoru*

3.1 Vlastnosti

Srovnání fyzikálních vlastností umělého kamene kategorie Solid surface a Quartz surface s kamenem přírodním (v tomto případě žuly, tj. kámen s minimálním obsahem křemene 20 %) je uvedeno v Tab. 2. Umělý kámen má proti kameni přírodnímu vyšší tepelnou roztažnost, která je ovšem např. z hlediska běžného kuchyňského provozu zcela irelevantní. Přírodní kámen je také více tepelně odolný, zatímco Quartz surface má odolnost průměrnou a Solid surface snese krátkodobé teplo pouze do 100 °C bez viditelných změn na jeho povrchu (přesto se doporučuje používat tepelnou podložku na odkládání horkých předmětů) a lze jej poškodit cigaretou. Přírodní kámen je také chladnější na dotek a barevně nestejnorodý. Dalším rozdílem je nenasákavost, která je oproti přírodnímu kameni lepší (např. na neimpregnované žule zůstávají skvrny po ovocných šťávách, jako je citron, víno, borůvky apod.). Umělý kámen je odolný vůči běžně používaným kapalinám (káva, čaj, ocet, ovocné a zeleninové šťávy apod.) a chemikáliím (desinfekční prostředky) používaných v domácnosti. Problémem může být dlouhodobé působení koncentrovaných chemikálii a jiných látek (kyseliny nebo rozpouštědla obsahující ketony a chlor) v lékařském a chemickém průmyslu, které mají většinou za efekt barevné změny povrchu. Zatímco Solid surface vyniká bezespárovou technologií, kdy spoje nejsou viditelné na delších výrobcích, spoje u Quartz surface a přírodního kamene viditelné jsou. Z hlediska ekologických parametrů je přírodní kámen zcela přírodní produkt, který díky uzavřenému povrchu nepodporuje růst bakterií. Stejnou vlastnost má i umělý kámen, který navíc vyhovuje normě 51 NSF/ANSI – Standard pro styk materiálu s potravinami (Quartz i Solid surface) a Solid surface také vyhovuje normě GreenGuard Indoor Air Quality Certificate (Svoboda, 2012; Mosaic Solid, 2014).

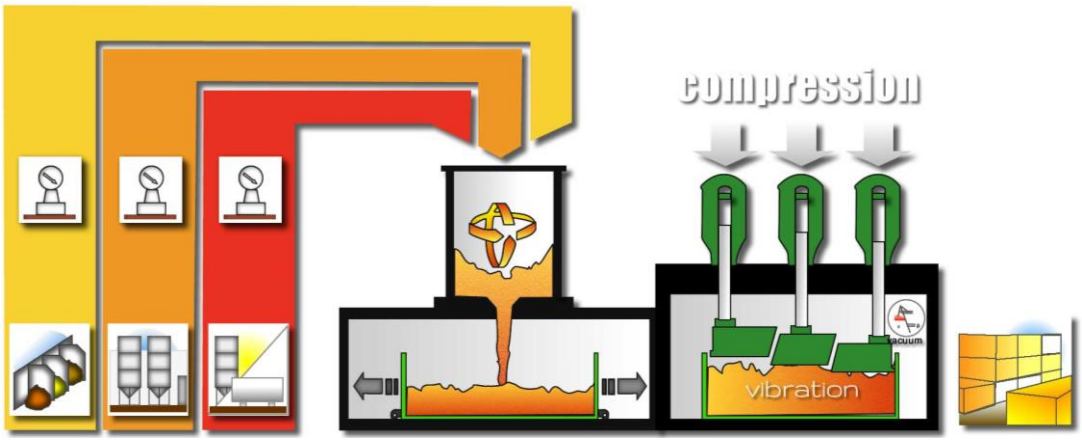
Tab. 2 Srovnání fyzikálních vlastností Solid surface, Quartz surface a přírodního kamene (Mosaic Solid, 2014)

Fyzikální vlastnosti	Jednotky	Solid surface	Quartz surface	Přírodní kámen (žula)
Objemová hmotnost	[kg/m^3]	1 700	2 400	2 670–2 800
Tvrdost	dle Mohse	2–3	6–7	5–6
Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	57–74	50–70	10–30
Nasákavost objemová	[%]	0,6	0,02	0,2–1
Tepelná odolnost	[°C]	100–110	140*	180–250

**140 °C garantovaných, 180 °C dosaženo při kuchyňských testech*

3.1.1 Quartz surface

Umělý kámen typu Quartz surface, též nazývaný konglomerovaný kámen, byl vyvinut v 60. letech 20. století italskou firmou Breton a v současnosti nachází největší uplatnění na výrobu kuchyňských pracovních desek. Je tvořen z 93 % směsí křemene a žuly a ze 7 % polyesterovou pryskyřicí, která zajišťuje jistou flexibilitu a kámen díky ní při opracování nepopraská, nicméně ho nelze tvarovat na rozdíl od Solid surface. Kvůli přítomnosti polyesterové pryskyřice a její UV nestabilitě se nedoporučuje Quartz surface používat v exteriéru, protože při dlouhodobé expozici by mohlo dojít k odbarvení kamene a selhání samotného pryskyřicového pojiva. Vyrábí se lisováním směsí kamenné drti a pryskyřice do desky nebo většího bloku pomocí „vibro--compression vacuum process“ (vibračně-kompresní vakuová technologie), kdy dochází k lisování za přítomnosti vakua a vibrací (Obr. 1). Díky této technologii dochází k optimálnímu stlačení kamenné směsi, a díky tomu je potřeba minimum pojiva. Technologicky se opracovává obvykle stejně jako kámen přírodní, a to za pomoci vodního paprsku, fréz nebo diamantových kotoučů (Umělý kámen.cz, 2011).



Obr. 1 Princip výroby Quartz stone pomocí vibračně-kompresní vakuové technologie

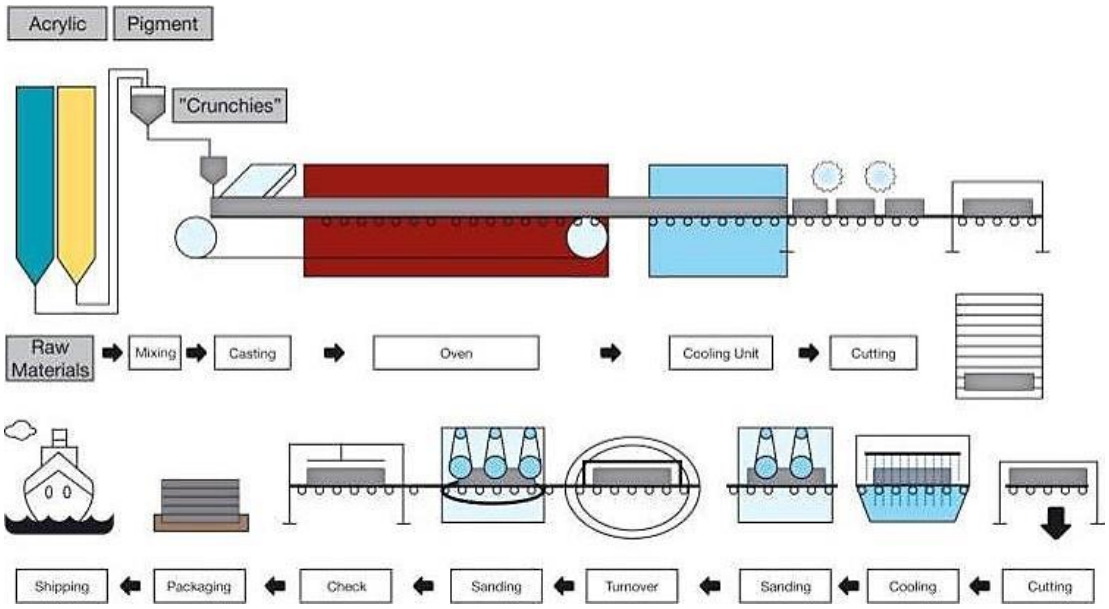
Do této kategorie umělého kamene patří celá řada materiálů od různých výrobců s obchodními názvy Avanza, Bitto, Bretonstone, Caesarstone, Cambria, Cimstone, Compac, Diresco, Fuyun Stone, Gulf Stone, HanStone Quartz, OKITE, Ordan Quartz Stone, Quartz Carpet, Plaza Stone, Quarella, Radianz, Rongguang, Santa Margherita, Silestone, Technistone, Top Stone, Totem Quartz, Viatera, Zodiaq aj. (Umělý kámen.cz, 2011).

3.1.2 Solid surface

Umělý kámen kategorie Solid surface byl vyvinut v roce 1967 vědci americké nadnárodní společnosti DuPont pod obchodní značkou Corian. DuPont je jeden z největších světových koncernů specializujících se na chemickou výrobu, a to především výrobu a zpracování polymerů (společnost má patentovány materiály jako např. nylon, neopren, teflon, lycra nebo kevlar). Mezi další produkty společnosti DuPont patří elektronika, barvy, potraviny a mnoho dalších, s čímž souvisí i zaměření dalších velkých společností, které se zabývají výrobou umělého kamene. Výroba totiž není tolik náročná na prostor (výrobní linka je poměrně malá), jak na finance, výzkum a výrobu kvalitních a barevně stálých lepidel na jejich spojování. Proto jsou jeho největší výrobci především velké světové koncerny (LG, Samsung, Wilsonart apod.), které disponují vlastními továrnami na chemické produkty, železárnami apod. (Andrések, 2016; DuPont, 2016).

Solid surface je vyroben ze 45–75 % (běžně se udává 66 %) trihydrátu hliníku, který se získává z přečištěného drceného bauxitu, což je čirý prášek fungující jako přirozený retardant hoření. Pojivem je zde nejčastěji akrylátová pryskyřice (PMMA – polymethylmetakrylát) nebo případně polyesterová (PES) pryskyřice, které tvoří přibližně 30 % materiálu. V případě použití polyesterové pryskyřice však nelze materiál nadále tvarovat. Aditiva v umělém kameni jsou dvojího druhu, a to výrobní a stabilizující. Obecně platí, že obsah bauxitu v umělém kameni se zvyšuje s přítomností zrn v příslušném dekoru.

Výroba umělého kamene Solid surface se zakládá na smíchání minerálních látek s akrylátovou pryskyřicí, a následným tvarováním do hmoty válcovitého tvaru. Tato hmota se poté rozemele, opětovně se přimíchá pryskyřice a proces se opakuje tak dlouho, dokud není hmota ve správném poměru pryskyřice a minerálních látek. Poté se hmota tvaruje do desek dle určených rozměrů. Ve velkovýrobě je základem „čirá“ barva, která se následně obarví na bílo a teprve poté dochází k barvení na plné barvy. Poměrově je potřeba přibližně 1 gram pigmentu na 1 tunu akrylátové pryskyřice a barvy nelze míchat klasickým způsobem jako např. malířské barvy, kdy kombinací žluté a modré barvy vznikne zelená. Výroba umělého kamene je znázorněna na Obr. 2 (Andrések, 2015; Závacký, 2015; Andrések, 2016).

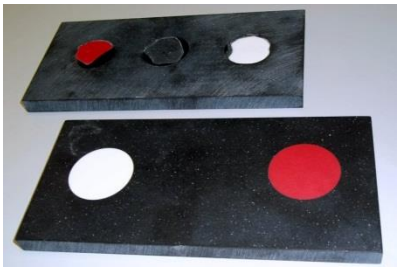


Obr. 2 Výrobní linka umělého kamene Hi-Macs® (Závacký, 2015)

Díky svým vlastnostem nabízí tento druh umělého kamene nové možnosti při tvorbě nábytku, kdy jej lze výborně opracovávat a leštit a především lepit za vzniku takřka neviditelných spár, přičemž díky absenci spojů a výškových nesrovnalostí je vysoce hygienický. Především jej lze téměř jakkoli tvarovat (tzv. thermoforming) a prosvětlovat (některé dekory se přímo vyrábí s translucentním efektem) a lze na něm vytvářet různé motivy a nápisy pomocí potiskování, technik inlay a intarzie, díky čemuž lze uspokojit téměř veškerá přání zákazníků, designerů, projektantů či architektů. Mimo samotný nábytek jej lze aplikovat na interiérové či exteriérové obložení, vyrábět z něj zařizovací předměty, originální osvětlení, nebo například vany a sprchové kouty. Velkou oblibu nachází při realizacích kuchyňských pracovních a umyvadlových desek, kde lze ze stejného materiálu také vytvořit dřez nebo umyvadlo, díky čemuž deska vypadá jako z jednoho kusu materiálu. Díky bezespárové technologii je tak dosaženo maximální ochrany proti usazování nečistot a bakterií v místech vystavených vlhkosti, a tím i mnohem nižších nároků na údržbu (Umělý kámen.cz, 2011; Svoboda, 2012).

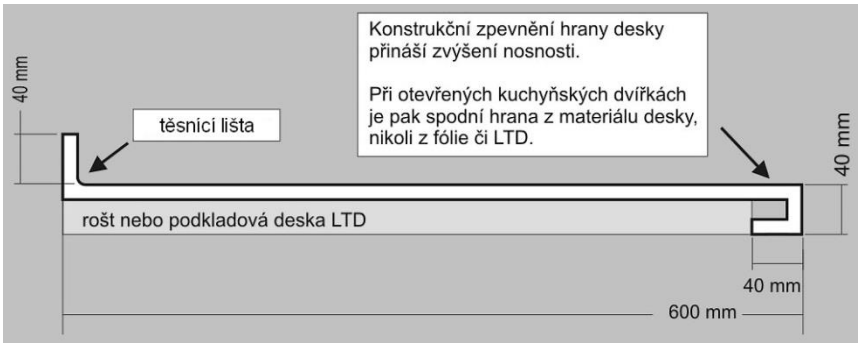
V porovnání s přírodním kamenem nevyniká umělý kámen kategorie Solid surface příliš vysokou tvrdostí a odolností proti poškrábání, nicméně je částečně pružný a houževnatý a především je vysoce odolný proti nárazu (deska o síle 6 mm vydrží pád koule o hmotnosti 250 g z výšky 900 mm). Jeho odolnost proti nárazu se současně zvyšuje skrze lepený podklad (běžně z DTD), který bývá celistvý nebo v podobě roštu. Výhodou je také jeho homogennost, díky které má v celém průřezu stejnou strukturu,

a tudíž nedochází ke třepení a postupnému odírání povrchu, naopak se průběžně s častým otíráním leští. S homogenností také souvisí možnost opravitelnosti, kdy je možné rýhy a škrábance zbrousit, popřípadě velká poškození zcela vyříznout a nahradit je segmentem ze stejného materiálu a dekoru, a tím opětovně dosáhnout nedotčeného vzhledu. Zapravení větších vad se provádí kónickým výřezem poškozeného místa, do kterého se následně těsně nalepí o trochu větší „zátka“ ze stejného materiálu a dekoru, a poté se zbrousí, viz Obr. 3 (Svoboda, 2012; Mosaic Solid, 2014).



Obr. 3 Opravení větších vad u Solid surface

Výrobci je dodáván především jako deskový materiál nejčastěji v tloušťkách 6, 12 a 19 mm v základním rozměru přibližně 3680 x 760 mm (délka se může lišit podle výrobce), který vychází z průměrné velikosti kuchyňské linky o hloubce 600 mm včetně těsnící lišty s obkladem do výšky 40 mm a čelní hrany tvaru „U“ zajišťující konstrukční zpevnění a tím i zvýšení nosnosti (Obr. 4). Těsnící lišta zabraňuje zatékání vody a současně zajišťuje snadnou údržbu pracovních desek (Andrések, 2016).



Obr. 4 Provedení kuchyňské pracovní desky z umělého kamene s těsnící lištou a konstrukčně zpevněnou hranou

Mezi nevýhody umělého kamene typu Solid surface patří jeho částečné odchylky ve vlastnostech v rámci jednotlivých obchodních značek a dekorů. Příkladem může být velikost zrn v daném dekoru, kdy větší zrna mohou zhoršovat ohýbání. Problémem také bývají některé tmavší barvy, jejichž prach je bílý, což negativně ovlivňuje

náročnost zpracování a viditelnost rýh na jeho povrchu. V rámci inovace představil v roce 2014 Corian na výstavě Kitchen and Bath Industry Show novou řadu dekorů DeepColor™ Technology, kdy běžně problematickým tmavým dekorům díky hlubšímu a intenzivnějšímu probarvení garantuje vyšší odolnost a snížení viditelnosti rýh až o 50 % (DuPont, 2015).

Do této kategorie umělého kamene patří celá řada materiálů od různých výrobců s obchodními názvy Akillika, Avonite, Bitto, Brilliant, Corian, Dellmond, Dovae, Formica/Surell, Getaart, Getacore, Gibraltar, Goldstone (Bien), Grand Stone, Grapol, Hanex, Harmony, Hi-Macs, Huaxun, Kanger, Kerrock, Koris, Krion, Kuraray, Laminart, Leada, Lechner, Magicstone, Meganite, Mermaid, Monerte, Montelli, Opal, Ordan, Owell Stone, Plexicor, Polystone, Pytron, Rehau, Schock/Sheer, Solid Top, Staron, Sunmoon, Swanstone, Topstone, Tristone aj. (Umělý kámen.cz, 2011; Mosaic Solid, 2014).

- **Corian**

Corian patří do skupiny umělého kamene Solid surface s pojivem z akrylátové pryskyřice (cca 75 %), díky čemuž je tvarovatelný. Je to netoxický a inertní materiál, ze kterého se za běžných podmínek neuvolňují jedovaté plyny, a při hoření dochází především k uvolňování oxidu uhličitého. Díky jeho zdravotní nezávaznosti je vhodný i do lékařských zařízení, laboratoří nebo na výrobu přebalovacích pultů. Současně splňuje mezinárodní normu DIN EN ISO 846 – Testování plastů, testování odolnosti proti plísním a mikroorganismům (Svoboda, 2012; Závacký, 2015). Přehled dodávaných formátů materiálu Corian je uveden v Tab. 3.

Tab. 3 Dodávané formáty materiálu Corian (DuPont Company, 2009)

Tloušťka formátu [mm]	Délka [mm]	Šířka [mm]
4	2490	930
6	2490	760 / 930
12	3658	760 / 930
19	3658	760

Lepidla vyráběná společností DuPont určená pro lepení tohoto materiálu jsou dvousložková. Jednotlivé složky (A a B) jsou dle DuPontu (2006) složeny z následujících sloučenin:

Složka A	45–65 %	PMMA pryskyřice
	35–55 %	methylmetakrylátový monomer
Složka B	> 90 %	směs benzoátů esterů
	< 3 %	diethylen glycol dibenzoát
		dipropylen glycol dibenzoát
		triethylen glycol dibenzoát
		benzoyl peroxid

Tab. 4 Přehled vlastností materiálu Corian v tloušťce 6 a 12 mm (DuPont Company, 2009)

Vlastnost	Jednotky	Testovací metoda	Deska tloušťky 6 mm	Deska tloušťky 12 mm
Hustota	[kg/m^3]	DIN ISO 1183	1 730–1 760	1 680–1 750
Modul pružnosti	[MPa]	DIN EN ISO 178	8 920–9 770	8 040–9 220
Pevnost v ohybu	[MPa]	DIN EN ISO 178	49,1–76,4	57,1–74,0
Protažení při přetržení	[%]	DIN EN ISO 178	0,58–0,94	0,76–0,93
Pevnost v tlaku	[MPa]	EN ISO 604	178–179	175–178
Odolnost proti nárazu (pružina)	[N]	DIN ISO 4586 T11	> 25	
Odolnost proti nárazu (pád kuličky)	[cm]	DIN ISO 4586 T12	> 120	
Tvrdost povrchu (Mohsův index)		DIN EN 101	2–3	
Odolnost povrchového opotřebení		DIN ISO 4586 T6	63–75	58–63
Rozměrová stabilita při 20 °C	% změna v délce	DIN ISO 4586 T10	< 0,16	
=Odolnost proti suchému teplu -180 °C		DIN ISO 4586 T8	4–5 nepatrná změna	
Světelná stálost (xenonová výbojka)	Blue wool scale	DIN ISO 4586 T16	> 6	
Odolnost proti bakteriím a houbám		DIN EN ISO 846	Nepodporuje růst mikrobů	
Elektrostatické povrchové chování	[Ω]	DIN IEC 61 340-4-1		> 1 × 10^12

- **Hi-Macs**

Materiál Hi-Macs obsahuje ve svém objemu 52–62 % trihydrátu hliníku, 30–50 % PMMA pryskyřice a zbylých 1–5 % je tvořeno kopolymerními barvivy. Přehled dodávaných formátů materiálu Hi-Macs je uveden v Tab. 5, kdy některé uvedené formáty jsou dostupné pouze pro určité dekory (Hi-Macs®, 2014).

Tab. 5 Dodávané formáty materiálu Hi-Macs (Hi-Macs®, 2016)

Tloušťka formátu [mm]	Délka [mm]	Šířka [mm]
3	3000	930
6	2490	760 / 910
9	3680	760 / 910
12	3680	760 / 910 / 1350
19	3680	760

Lepidla vyráběná společností LG Hausys určená pro lepení tohoto materiálu jsou dvousložková. Jednotlivé složky (A a B) jsou dle Hi-Macs® (2014) složeny z:

Složka A	30–60 %	PMMA pryskyřice
Složka B	< 60 %	dipropylen glycol dibenzoát
	< 3 %	benzoyl peroxid

Tab. 6 Přehled vlastností materiálu Hi-Macs v dekorové řadě Solids (plné barvy) a Granite (s větším zrnem) (Hi-Macs®, 2014)

Vlastnost	Jednotka	Testovací metoda	Solids	Granite
Hustota	[kg/m^3]	ISO 1183	1 750	1 650
Modul pružnosti	[MPa]	DIN EN ISO 178	8 900	7 730
Pevnost v ohybu	[MPa]	ASTM D638	70,1	64,3
Protažení při přetržení	[%]	DIN EN ISO 178	1	1,1
Pevnost v tahu	[MPa]	DIN EN ISO 527	69,5	56,3
Povrchová tvrdost tužkami		ISO 15184	>9H	
Odolnost proti nárazu (pád kuličky)	[mm]	E DIN EN 438	≥1500	
Tvrdost povrchu (Mohsův index)		EN 101	2–3	
Absorpce vody (hmotnost)		DIN EN 438 Part 12	< 0,1%	
Odolnost proti suchému teplu	[°C]	DIN 68 861, Part 7, 04'85	≥100 (7C)	
Odolnost proti vlhkému teplu	[°C]	DIN 68 861, Part 7, 04'85	≥100 (7C)	
Odolnost proti změnám teploty	[°C]	UNI 9429	beze změny	
Tepelná vodivost	[W/mK]	DIN EN 12664	0,636	0,55
Tepelná odolnost	[m^{2}K/W]	DIN EN 12664	0,038	0,045
Odolnost proti poškrábání		DIN 68 861, Part 4, 11-'81	4D	4B
Světelná stálost (xenonová výbojka)	stupnice 0–10	DIN 53 387, 04-'89	> 6	
Styk s potravinami		LMBG § 31	vyhovující pro všechny dekory	
Hygieničnost		LGA Hygiene Certificate	vyhovující	

- **Avonite**

Avonite byl prvním umělým kamenem kategorie Solid surface, který byl vyroben na bázi polyesterové pryskyřice, a to společností Aristech Surfaces LLC v roce 1983. V současnosti jsou k dostání dva základní typy tohoto umělého kamene – Avonite Studio Collection a Avonite Foundation Collection. V případě Studio Collection je materiál tvořen méně než 60 % trihydrátem hliníku, méně než 2 % barvivy a zbytek (42–93 %) je tvořeno polyesterovou pryskyřicí, kvůli čemuž není možné materiál ohýbat a tvarovat. Naopak Foundation Collection je pojeno PMMA pryskyřicí (více než 30 %), 40–70 % je tvořeno trihydrátem hliníku a méně než 5 % jsou barviva. Přehled dodávaných formátů materiálu Avonite je uveden v Tab. 7 (Aristech Surfaces LLC, 2014a; Aristech Surfaces LLC, 2014b).

Tab. 7 Dodávané formáty materiálu Avonite (Aristech Surfaces LLC, 2015b)

Tloušťka formátu [mm]	Délka [mm]	Šířka [mm]
6	2438	914 / 1214 / 1518
12	3658 3048	762 914

Lepidla vyráběná společností Aristech Surfaces LLC určená pro lepení tohoto materiálu jsou dvousložková. Jednotlivé složky (A a B) jsou dle Aristech Surfaces LLC (2015b) složeny z následujících sloučenin:

Složka A	40–70 %	methylmetakrylátový monomer
	1–5 %	methakrylátová kyselina
Složka B	5–15 %	benzoyl peroxid

3.2 Technologické operace při zpracování Solid surface

Umělý kámen této kategorie se opracovává ideálně nástroji ze slinutých karbidů, které jsou určeny k obrábění lehkých kovů, a oproti nástrojům na zpracování dřeva by měly být tyto nástroje masivnější, tužší a odolnější vůči vibracím. Umělý kámen se zpracovává třískovými i beztřískovými operacemi, kdy při třískových se s ním zachází jako s velmi tvrdým dřevem. Z důvodu agresivního prachu umělého kamene je potřeba stroje a nástroje pravidelně čistit, aby nedocházelo k jejich zanášení (např. ložiska) a snižování životnosti (Svoboda, 2012; Závacký, 2015; Andrések, 2016).

3.2.1 Formátování

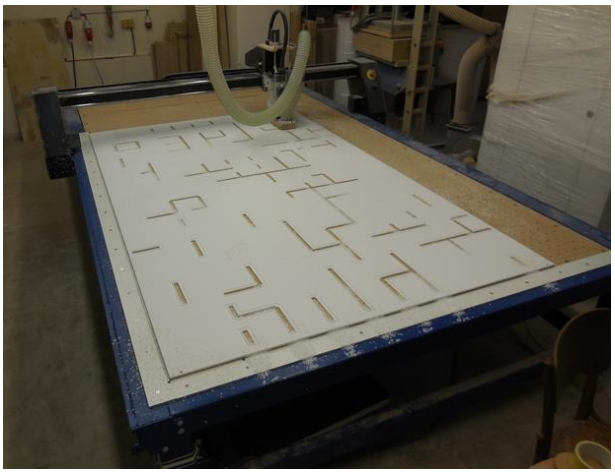
Formátování lze provádět na běžných kotoučových pilách a ideální je použití pilových kotoučů s břity ze slinutých karbidů, které jsou běžně určeny na řezání Al profilů (střídavě rovné a trapézové zuby s negativním úhlem čela). Z důvodu velkých rozměrů základních desek a tím pádem ztížené manipulace je potřeba dvou pracovníků. Z důvodu dosažení optimální výtěžnosti se formátuje na základě nářezových plánů, stejně jako u jiných velkoplošných materiálů (Svoboda, 2012; Závacký, 2015).

3.2.2 Frézování

Frézování je dvojího druhu, a to běžnými horními nebo speciálními frézkami. Při použití horních frézek se doporučuje používat nástroje s průměrem stopky min. 12,7 mm kvůli maximální tuhosti. Tyto frézky se používají na frézování vnějších rádiů, drážek a polodrážek (např. pro vlepení nerezových tyček pro odkládání horkých předmětů), na „odkapové“ drážky na kuchyňské pracovní desky nebo na různé otvory (Obr. 5). Mimo jiné se využívají při frézování různých znaků a ornamentů, které chceme následně prosvětlit pomocí LED pásků nebo např. zpracovat technikou inlay. Speciální frézky slouží k frézování vnitřních rohů (např. u dřezů a umyvadel ze stejného materiálu), kdy před touto operací je k materiálu přilepen jiný kus stejného materiálu, který bude následně odfrézován (Obr. 6). Pro složitější tvary se využívá frézování pomocí CNC, viz Obr. 7 (Svoboda, 2012; Závacký, 2015).

Obr. 5 „Odkapové" drážky (vlevo) a odkládací plocha na horké předměty (vpravo)

Obr. 6 Postup frézování těsnící lišty kuchyňské pracovní desky (Závacký, 2015)



Obr. 7 Ukázka frézování umělého kamene pomocí CNC Cybertronic

3.2.3 Broušení

Umělý kámen je dobře brousitelný a tato operace je důležitá pro výsledný vzhled zpracovávaného objektu – především z důvodu dosažení „neviditelného spoje“ po operaci lepení nebo dosažení žádoucího stupně lesku. Broušení se provádí v několika etapách a rozlišuje se broušení bezproblémových a problematických dekorů (např. některé tmavé dekory). Jako nástroj se používají vibrační a rotačně-vibrační brusky (Svoboda, 2012; Závacký, 2015).

Obecně se pro kuchyňské pracovní desky nedoporučuje lesk z důvodu vyšších nároků na údržbu, kdy lze lesk snadno narušit hrubšími materiály (např. hrubší strana houbičky na umývání). Současně také většinou nelze v lesku vyrobit dřezy a umyvadla z důvodu komplikovanějších tvarů. Pro dosažení lesku se používají brusné prostředky se zrnitostí 1200, 1400 a 2000 (Andrések, 2015).

Pro broušení umělého kamene se běžně používají brusné prostředky a nástroje s odlišnou zrnitostí v následující návaznosti:

1) 80
2) 120
3) pudr
4) 180
5) 240
6) 400.

Funkce pudru je zvýraznit případné vady, které mohly vzniknout při hrubším broušení, a je dvojího typu – bílý na tmavé dekory a černý naopak na dekory světlé. Pudr se aplikuje na broušenou plochu a následně se odstraní, čímž se objeví probroušená místa, která je potřeba ještě opracovat. Poslední krok je prováděn pomocí houby se zrnitostí 400, která má za úkol plochu doleštit (Andrések, 2015).

Kromě výše uvedené návaznosti použitých zrnitostí se v praxi ještě uplatňuje lehce odlišný postup, který se používá při broušení problematických dekorů:

1) 80
2) 120
3) pudr
4) 180
5) 240
6) pudr
7) 320
8) 400
9) 500
10) 400.

V takovém případě se používá brusný prostředek o zrnitosti 500 pro zbavení povrchu nechtěných skvrn. Současně ale při takovém broušení dochází k narušení matu, a proto je z důvodu dosažení žádoucí kvality povrchu následně přebroušen prostředkem o zrnitosti 400 (Závacký, 2015).

3.2.4 Soustružení a vrtání

Jak již bylo uvedeno, umělý kámen se běžně dodává jako deskový materiál, ale po slepení jednotlivých desek je možné jej díky jeho homogenitě soustružit. Při soustružení ovšem následně vzniká problém s tímto typem obrábění v místech lepeného spoje. Tuto operaci lze nahradit odlitím hmoty do forem pro dosažení žádoucího tvaru (např. výroba van), nicméně je tato varianta finančně mnohonásobně náročnější a současně lze k tomuto účelu použít pouze jednobarevné dekory bez zrn. Kvůli sedimentační schopnosti zrn by zůstaly na dně odlévací formy a nedošlo by k „prorýsování“ zrn celým průřezem objektu (Závacký, 2015).

Pro vrtání umělého kamene se běžně doporučuje používat vrtáky určené na kovy, nebo vrtáky opatřené SK plátky (Svoboda, 2012).

3.2.5 Tvarování za pomoci tepla (thermoforming)

Tvarovat jdou pouze umělé kameny typu Solid surface s pojivem z akrylátové (PMMA) pryskyřice, a to vždy za přítomnosti zvýšené teploty okolo 170 °C (teplota

závisí na daném materiálu a dekoru). Jako předhřev slouží speciální pece, které materiál prohřívají rovnoměrně z obou stran, a doba prohřátí desky je závislá na zvoleném dekoru. Jeden milimetr tloušťky desky se prohřívá zhruba 1 minutu a obecně je časově náročnější prohřátí materiálů se zrny, zatímco jednobarevné dekory se prohřívají rychleji. Po prohřátí a následném vytažení z pece je možné umělý kámen ihned tvarovat i lidskou silou (za pomocí rukavic), viz Obr. 8. Ruční tvarování se využívá například při tvarování hrany oblené pracovní desky (Andrések, 2015; Závacký, 2015).

Obr. 8 Ukázka ručního tvarování umělého kamene

Samotné tvarování může probíhat buď ve vakuovém membránovém lisu, nebo v lisu hydraulickém. Do membránového lisu (Obr. 10, vlevo)se vkládá materiál na MDF formu, lis se zafixuje silikonovou membránou, vyvěva odsaje vzduch a čerpadlo vyvine tlak 9 tun/m^2, který stlačuje desku do formy. Tvarování trvá přibližně 15–20 min, poté je tvarovaný objekt 30–50 minut klimatizován. Minimální rádius pro tento typ tvarování je přibližně dvojnásobek tloušťky zpracovávaného materiálu. Problémem tohoto typu tvarování může být lisování složitějších tvarů, kdy je potřeba předem vkládat už přesně dimenzovaný materiál, jelikož tato technologie nevyužívá protiformu (Cetecho, 2011; Andrések, 2015).

Obr. 9 Membránový lis se speciální pecí na prohřátí desky (vlevo) a hydraulický lis (vpravo)

Tvarování hydraulickým lisem (Obr. 9, vpravo) probíhá za většího tlaku a za možnosti hlubších výlisků. Proto je tato technologie vhodná například pro výrobu umyvadel. Formy jsou nejčastěji vyrobeny z hliníku, stejně jako protiformy. Tvarování touto technologií trvá přibližně 10 minut (Cetecho, 2011).

Obr. 10 Ukázka tvarování Solid surface v membránovém („stolička“) a hydraulickém (umyvadla) lisu

3.2.6 Lepení

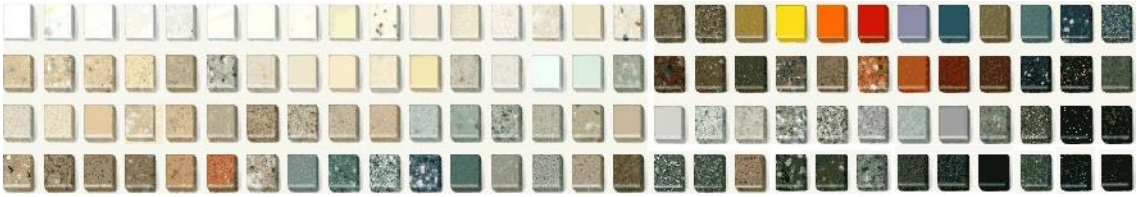
Před samotnou operací lepení musí být lepené hrany důkladně očištěné technickým lihem, aby byly zbaveny veškerých nečistot. Důležitá je také jakost řezané hrany, která musí být co nejvyšší, aby mohlo být dosaženo „neviditelného“ spoje. Na plochy desek, které se mají spojit, se tavným lepidlem přilepí hranolky ze surové dřevotřísky. Ty slouží k zafixování svorek, kterými se po nanesení lepidla do lepené spáry desky k sobě co nejvíce přitlačí. Po vytvrzení spoje se svorky a hranolky ze surové dřevotřísky odstraní a plochy se očistí technickým lihem, aby se mohla deska začít brousit (Závacký, 2015).

Lepidla pro lepení umělého kamene jsou dodávána přímo výrobci daného materiálu a běžně je pro každý dekor určené vlastní lepidlo, aby po vytvrzení a zbroušení nebylo ve spáře vidět. Lepidla jsou dvousložková a ke smíchání obou složek dochází ve speciální pistoli v mísící trysce. Lepený materiál je naleptáván (lepidla obsahují peroxid, který funguje jako iniciátor reakce), proto je vyžadována co nejvyšší kvalita lepených ploch. Současně je velice důležitá kvalita lepidla, a to nejen z důvodu neviditelného vytvrzení. Aby časem nedošlo k narušení spoje, musí být lepidla správně skladována a nesmí přemrznout, což může být někdy úskalí dopravy materiálu ze zahraničí. Běžně dodávaná lepidla bývají v balení o 45–50 ml nebo 250 ml.

Lepidla jsou vysoce hořlavá a dráždící pokožku a dýchací cesty (Hi-Macs®, 2014; Andrések, 2016).

3.3 Použití Solid surface v nábytkářském průmyslu

Díky svým vlastnostem a širokou nabídkou materiálů a dekorů (Obr. 11) je umělý kámen hojně využívaný jak v bytovém interiéru, tak v komerčních prostorech. V následující kapitole jsou uvedeny nejčastější prvky vyráběné z tohoto materiálu.



Obr. 11 Ukázka dekorů umělého kamene kategorie Solid surface (Corian)

- **Kuchyňské pracovní desky a dřezy**

Solid surface je v současnosti oblíbeným materiálem na výrobu kuchyňských pracovních desek (Obr. 12). Díky své neporézní struktuře odolné proti skvrnám spolu s „neviditelnými“ spoji nabízí vysoce hygienický materiál snadný na údržbu. Současně je možné vyrobit dřez a obklad s těsnící lištou z téhož materiálu, čímž pracovní deska působí dojmem, jako kdyby byla vyrobena z jednoho kusu materiálu. Do desky jdou také vyfrézovat „odkapové“ drážky, nebo drážky pro následné vlepení kovových profilů sloužících jako prostor pro odložení horkých předmětů.

Obr. 12 Pracovní deska se dřezem a obkladem z dekoru s translucentní efektem

- **Umyvadlové desky a umyvadla**

Umyvadlové desky z umělého kamene jsou též populární díky svým hygienickým vlastnostem a tato schopnost nachází široké uplatnění v komerčních prostorech (např. obchodní centra, restaurace s rychlým občerstvením, letiště aj.), kde nízké požadavky na údržbu (odpadá složité drhnutí spár) a možnost opravitelnosti převyšují vyšší pořizovací cenu. Současně nabízí širokou škálu tvarů umyvadel (Obr. 13).

Obr. 13 Umyvadlové desky s umyvadly z umělého kamene Solid surface

- **Vany a sprchové kouty**

Z umělého kamene je také možné vyrobit celou vanu, popřípadě sprchový kout (Obr. 14). U sprchového koutu lze podlahu vytvořit společně s obložením stěn, čímž je opět eliminováno náročné čistění spár. Z experimentu společnosti Cetecho s.r.o. se z hlediska kluznosti ve sprchovém koutě více osvědčil nijak neupravený povrch umělého kamene, než povrch texturovaný.

Obr. 14 Vana (vlevo) a sprchový kout (vpravo)

- **Koupelnový nábytek**

Jak již bylo uvedeno, díky svým hygienickým vlastnostem je ideálním materiálem pro zařizovací předměty v místech s vyšší koncentrací vlhkosti (Obr. 15).

Obr. 15 Koupelnový nábytek z umělého kamene

- **Barové a recepční pulty**

Díky takřka neomezeným možnostem tvarování lze z umělého kamene vytvořit originální recepce, jejichž výsledný tvar je umocněn absencí viditelných spojů. Současně se zde často uplatňuje možnosti prosvětlování materiálu pomocí LED pásků, který se například využívá pro zobrazení názvu či loga společnosti (Obr. 16 a Obr. 17).

Obr. 16 Recepční pulty z umělého kamene

Obr. 17 Ukázka možností prosvícení (vlevo) a tvarování (vpravo) umělého kamene

- **Ostatní nábytek**

Umělý kámen je možné použít v podstatě na jakékoli realizace nábytku (Obr. 18), nicméně z důvodu jeho vyšší hmotnosti se ho nedoporučuje ve velkém množství používat na sedací nábytek, a to z důvodu ztížené manipulace. Ze stejného důvodu se proto běžně používá v kombinaci s dalšími materiály.

Obr. 18 Sedací nábytek na výstavě v Milánu (vlevo) a knihovna (vpravo) z umělého kamene

- **Svítidla**

Solid surface je díky své možnosti prosvícení pomocí LED pásků také možné využít na výrobu designových svítidel. K tomuto účelu se používají tenčí desky materiálu se speciálními dekory, popřípadě lze odfrézovat část hmoty materiálu. Mimo svítidel lze takto oživit i běžný nábytek, viz Obr. 19.

Obr. 19 Prosvětlená police (vlevo) a designová lampa na dálkové ovládání (vpravo)

4 OBRÁBĚNÍ PILOVÝM KOTOUČEM

Obráběním (řezáním) se rozumí technologický proces, při kterém pomocí cizího tělesa (řezným nástrojem – např. řezným klínem nebo zubem) odebíráme z obráběného materiálu určitou část hmoty. Řezný nástroj lze definovat jako jakékoliv cizí těleso klínovitého tvaru, které vniká do materiálu za účelem odstraňování jeho hmoty. Odebíranou hmotu lze definovat určitým tvarem a objemem a nazýváme ji tříska (Varkoček et al., 2004).

Obrábění lze dle Varkočka et al. (2004) rozdělit na třískové a beztřískové:

Tab. 8 Rozdělení obrábění (Varkoček et al., 2004)

TŘÍSKOVÉ	**– řezání**	**– hoblování**
	– frézování	**– škrabání**
	– soustružení a okružení	**– broušení**
	– vrtání	**– rašplování a pilování**
	– dlabání	**– leštění**
BEZTŘÍSKOVÉ	**– hlazení**	→ třením smykovým za studena
		→ třením smykovým za tepla
		→ tření valivým za tepla
	– koncentrovanou energií	→ tepelnou (laserem)
		→ hydromechanickou (vodním paprskem)
	– tvarování	→ ohýbáním
		→ tvarovým lisováním

Řezání lze také rozdělit na otevřené (volné) a uzavřené (ve spáře). V případě otevřeného řezání probíhá proces působením pouze jedné hrany řezného klínu, naopak v případě uzavřeného řezání vstupuje do procesu kromě hlavního ostří i ostří boční čelní (Varkoček et al., 2004).

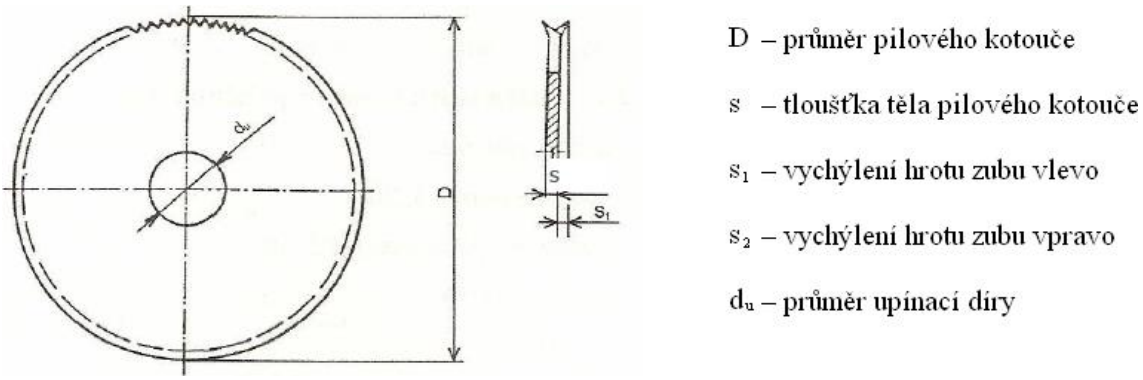
V případě třískového obrábění lze proces úběru hmoty (třísky) z obráběného materiálu technologicky popsat z hlediska průběhu chování nástroje, materiálu i samotné třísky. Proces začíná v místě styku materiálu a nástroje, kdy dochází k deformaci řezaného materiálu. Tato deformace je úměrná např. stupni otupení břitu, velikosti úhlu řezu nebo pružnosti obráběného materiálu. Po překonání potřebného napětí dochází k oddělení části materiálu. Napětí, které je potřeba překonat, je rovné pevnosti ve střihu řezaného materiálu. Oddělená tříska je pak odkláněna řezným nástrojem, přičemž dochází k jejímu tření o čelo tohoto nástroje. Současně dochází

ke tření mezi hřbetem zubu a obrobenou plochou, stejně jako mezi bočními plochami a materiálem v řezné spáře (Varkoček et al., 2004).

Cílem samotného procesu řezání je rozdělení obráběného materiálu na menší části a tento technologický proces probíhá pomocí nástroje s vytvořeným ozubením (ozubeným plechem) neboli pilou. Pily můžeme dělit na rámové, kotoučové, pásové a řetězové (Varkoček et al., 2004).

4.1 Pilové kotouče

Pilový kotouč (Obr. 20), který tvoří řezný nástroj kotoučových pil, je ozubený plech kruhového průměru, na jehož obvodu jsou umístěny pilové zuby. Vyznačuje se určitým průměrem, druhem materiálu, otvory v jeho středu sloužící k upnutí a počtem a tvarem zubů. Upínání pilových kotoučů na pilovou hřídel je zajištěno pomocí dvou upínacích přírub, mezi které se upíná samotný pilový kotouč (Nutsch, 2006).



Obr. 20 Charakteristika pilového kotouče (Javorek, 2006)

Z pevnostních a technologických důvodů je pilový kotouč vybaven řeznými a tvarovými prvky, které zajišťují jeho nejúčinnější provoz. Mezi řezné prvky patří především řezné zuby, které lze popsat jako dlouhé tenké destičky, které jsou připájené do rovinných částí otvorů v těle nástroje. Tvarovými prvky se rozumí prvky uvnitř či na obvodě pilového kotouče – tepelné dilatační drážky a odlehčovací otvory (Lichtág, 1999).

Správná funkce pilového kotouče je dle Javorka (2006) podmíněná:

- správnou volbou rozměru kotouče, geometrie pilových zubů a vhodným upevněním,

- monitorováním teploty kotouče a zajištěním proti jejímu zvyšování,
- zajištěním správných otáček kotouče,
- správnou přípravou pilového kotouče k práci, jako je samotná údržba, naostření apod.,
- správným vnitřním napětím pilového kotouče.

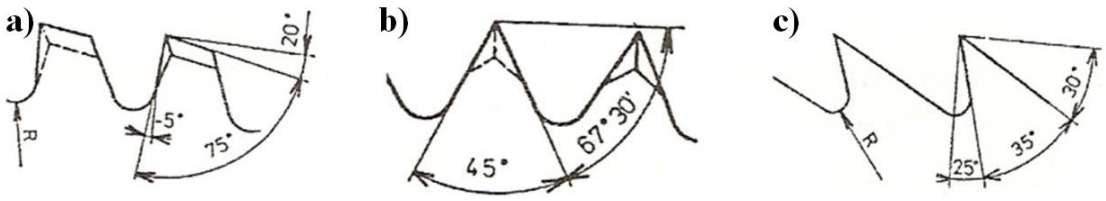
Pilové kotouče lze dělit podle mnoha kritérií, přičemž základní rozdělení jsou rozebrána v následujících podkapitolách. Mimo jiné lze pilové kotouče dělit i podle směru řezání vzhledem k dřevním vláknům, tvaru zubu a zubové mezery, materiálu řezné hrany apod.

4.1.1 Dělení na celistvé a pájené pilové kotouče

- **Celistvé pilové kotouče**

Celistvé kotouče se vyznačují tím, že jsou vylisovány z jednoho kusu oceli, a jsou opatřeny požadovaným ozubením. Primárně se používají na obrábění masivního dřeva, ale z důvodu rychlého opotřebení materiálu v současnosti hrají pouze podřadnou roli (Nutsch, 2006).

Celistvé kotouče mohou mít různé druhy zubů – zuby s lomeným nebo oblým hřbetem (Obr. 21, a), s trojúhelníkovým nesouměrným ozubením (Obr. 21, b), s trojúhelníkovým souměrným ozubením (Obr. 21, c) nebo s ozubením hladícím pro příčné nebo podélné řezání (Javorek, 2006).



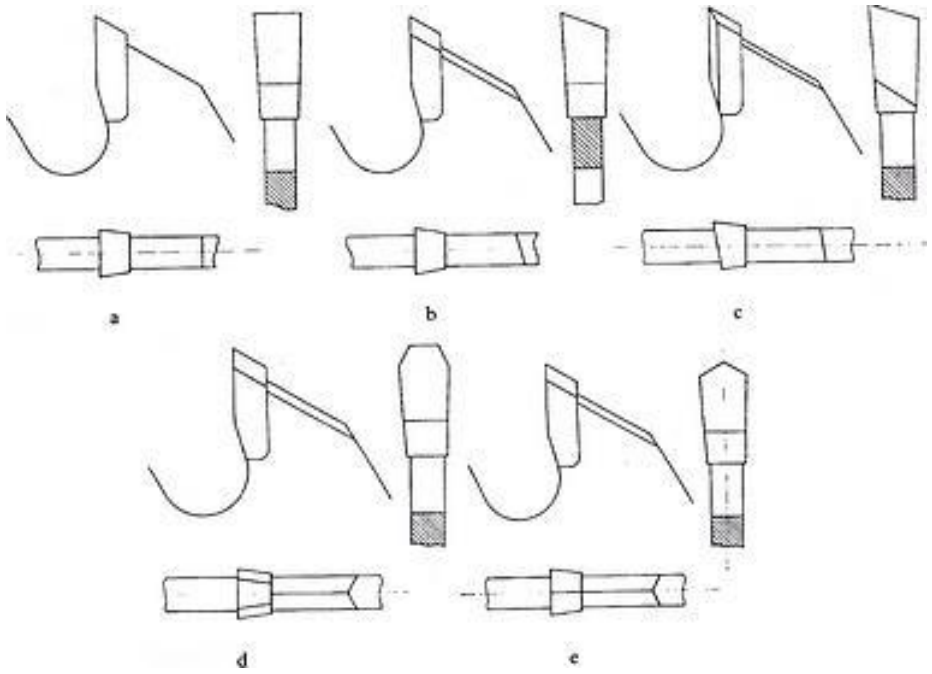
Obr. 21 Druhy zubů jednodílných pilových kotoučů (Javorek, 2006)

- **Pájené pilové kotouče**

Pájené pilové kotouče se od jednodílných liší tím, že mají na samotném kotouči připájené destičky ze slinutých karbidů, které mohou být ještě opatřeny vrstvičkou polykrystalického diamantu. Břity jsou z důvodu napájení širší než kotouč, tudíž není

potřeba rozvedení zubů. Destičky ze slinutých karbidů se vyznačují vysokou výkonností za předpokladu, že je volen vhodný kotouč pro konkrétní řezání. S vhodnou volbou kotouče souvisí i trvanlivost ostří, kdy nevhodnou volbou pilového kotouče může docházet k rychlejšímu otupení ostří (Nutsch, 2006).

Mezi základní druhy zubů pájených pilových kotoučů patří zuby rovné a střídavé (Obr. 22, a, b, c), které se používají pro podélné řezání měkkého a tvrdého dřeva, dřevovláknitých desek, překližek a plastických hmot. Dalšími druhy zubů jsou trapézové (lichoběžníkové) a střechovité (Obr. 22, d, e), přičemž existují i různé kombinace uvedených zubů (Javorek, 2006).



Obr. 22 Druhy zubů pájených pilových kotoučů (Javorek, 2006)

Pilové kotouče se slinutými karbidy bývají dle konstrukce ozubení děleny na kotouče se zuby rovně broušenými z čela i hřbetu, střídavě šikmými, jednostranně šikmými, dutě broušenými z čela, trapézovými dutě broušenými a s ozubením kombinovaným – rovně broušené zuby z čela a hřbetu v kombinaci s rovně broušenými trapézovými zuby nebo střechovitě broušenými zuby (Prokeš, 1982).

4.1.2 Dělení podle průměru a tvaru pilového kotouče

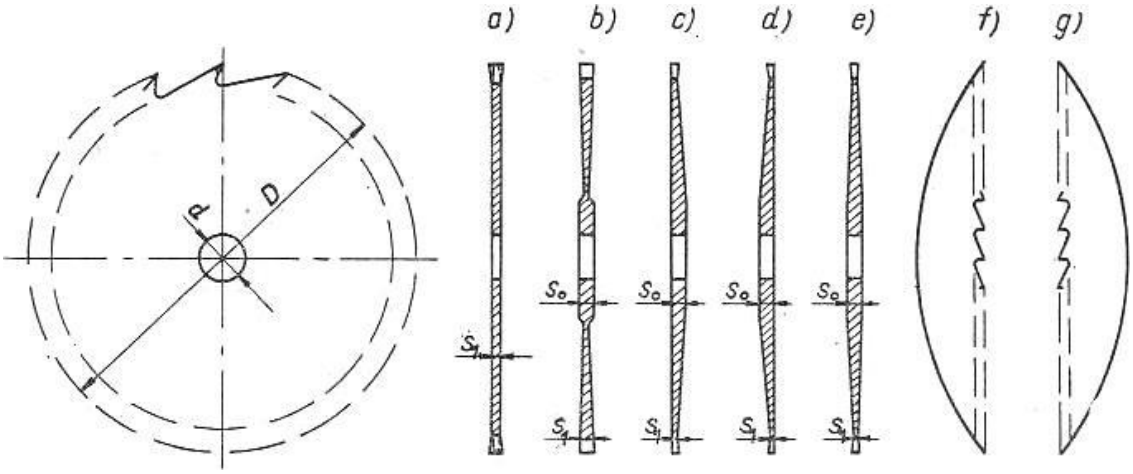
Průměr pilového kotouče má vliv na samotný řezný proces a dle Prokeše (1984) by měl být kotouč pokud možno co nejmenší, a to z následujících důvodů:

- během podélného řezání je kotoučem odebírána tříska více ve směru rovnoběžném s dřevními vlákny, což má za následek snížení potřebného výkonu k řezání,
- dochází ke zmenšení tloušťky odebírané třísky, což má za následek zlepšení jakosti řezné spáry,
- pilový kotouč může být díky menšímu průměru tenčí a může mít menší rozvod, což zmenšuje tloušťku řezné spáry a spotřebu energie,
- menší kotouče jsou stabilnější a nejsou tolik hlučné,
- ostření těchto kotoučů je finančně úspornější.

Minimální průměr pilového kotouče lze vypočítat ze vztahu (1) a závisí jak na konstrukci stroje, tak i na způsobu jeho použití. U strojů s pilovým kotoučem pod stolem vchází do vztahu řezná výška *h,* vzdálenost stolu od osy hřídele h_s a minimální přesah kotouče nad obrobkem p_{min} (Prokeš, 1982).

$$D_{min} = 2(h + h_s + p_{min}) \quad \text{[mm]} \tag{1}$$

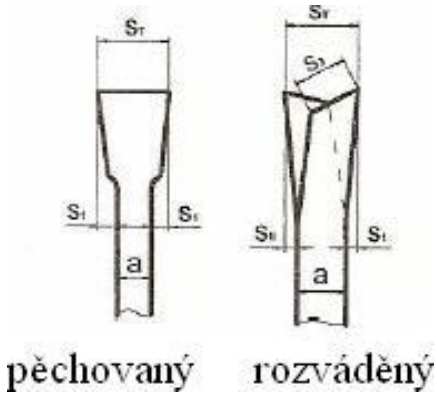
Podle tvaru pilového kotouče v příčném řezu rozlišujeme kotouče ploché (Obr. 23, a), podbroušené neboli hoblovací (Obr. 23, b), sbíhavé na levé nebo pravé straně, eventuálně oboustranně (Obr. 23, c, d, e) a vyduté vlevo nebo vpravo (Obr. 23, f, g) (Prokeš, 1984).



Obr. 23 Dělení podle tvaru pilového kotouče (Prokeš, 1984)

4.1.3 Dělení podle úpravy řezného zubu

Úpravu řezného zubu lze rozdělit na dva typy, a to na zub rozváděný (Y) nebo pěchovaný (∇) (Holopírek, 2000).



Obr. 24 Úprava řezného zubu (Javorek, 2006)

- **Rozvádění zubů**

Rozvod zubů má vliv jak na výslednou drsnost obrobeného povrchu, tak i na ekonomické faktory výroby. Příliš malý rozvod negativně ovlivňuje pilový kotouč, který se zahřívá, ztrácí tuhost a zabíhá. Naopak při příliš velkém rozvodu se zvyšuje spotřeba energie, zvyšuje se již zmíněná drsnost řezné spáry spolu s vlnitostí a snižuje se výtěžnost materiálu. Rozvod je pouze v horní třetině zubu a nesmí být větší než ½ tloušťky těla kotouče (Prokeš, 1982).

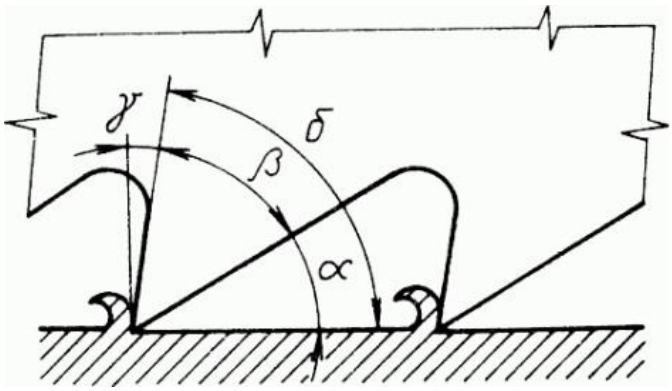
- **Pěchování zubů**

Pěchované zuby jsou dokonalejším nástrojem než zuby rozváděné, a to hned z mnoha důvodů. Zatímco u rozváděných zubů se velikost rozvodu během řezání mezi dvěma ostřeními mění, u pěchovaných zubů zůstává rozšíření nezměněné. Také oproti rozváděným zubům odebírá za stejných podmínek poloviční tloušťku třísky, díky čemuž je možné dosáhnout stejné kvality řezné spáry i za vyšších posuvů. S tím souvisí i možnost použití větších roztečí zubů o 25 až 50 %, které zvětšují prostor pro odváděné třísky. Díky pravidelnějšímu tvaru třísek se mezery zubů téhož profilu plní asi o čtvrtinu méně než u rozváděných zubů, což má pozitivní vliv na namáhání nástroje (Prokeš, 1982).

4.2 Geometrie pilových kotoučů

Velkou roli při řezání hraje geometrie břitu, tedy tvar, počet a naostření pilových zubů. Aby byly zuby pilového kotouče schopny vniknout do obrobku, musí ostří s obrobkem svírat odpovídající úhel, který je v tomto případě určen úhlem řezu a čela (příkladem negativního úhlu čela mohou být pilové kotouče, které se používají na řezání neželezných kovů). Současně záleží i na úhlu hřbetu, který snižuje tření díky tomu, že určuje vzdálenost neřezajících částí zubu od obráběného materiálu. Svou roli hraje i tvar mezizubí, kterým jsou odváděny již oddělené třísky, díky čemuž se čistí řezná plocha (Nutsch, 2006).

Základní geometrie řezného zubu je uvedena na Obr. 25. Všechny řezné úhly musí mít optimální hodnotu, protože jejich velikost má vliv na řezné podmínky a trvanlivost samotného ostří. Pro úhly v hlavní sečné rovině platí, že součet úhlů hřbetu, břitu a čela musí tvořit pravý úhel, tedy $\alpha + \beta + \gamma = 90°$ (Fiala a Chrást, 1983; Prokeš, 1984).



Obr. 25 Geometrie řezného zubu

- **Úhel hřbetu α**

Úhel α definuje úhel hřbetu, tedy úhel svíraný hřbetem břitu a směrem řezného pohybu. Velikost úhlu hřbetu ovlivňuje tření hřbetu zubu o obrobenou plochu. Čím je tento úhel menší, tím větší tření vzniká mezi hřbetem a obráběnou plochou (především u otupeného nástroje) a současně dochází ke zvětšování řezného odporu a vyššímu zahřívání nástroje. Pokud je ale úhel α příliš velký, je tím pádem úhel břitu příliš malý a dochází tím ke snižování trvanlivosti břitu. Větší úhel hřbetu by měl být zvolen v případě obrábění pevnějších materiálů, při malých posuvech a velké řezné rychlosti (Fiala a Chrást, 1983; Prokeš, 1984).

- **Úhel břitu β**

Úhel β definuje úhel břitu, tedy úhel svíraný čelem a hřbetem břitu. Čím je tento úhel větší, tím vzniká i větší odpor obráběného materiálu proti vnikání nástroje. Naopak při malém úhlu břitu klesá pevnost samotného břitu a dochází k rychlejšímu otupení. Z toho se důvodu se menších úhlů β využívá při obrábění měkkých materiálů, zatímco větších úhlů břitu se využívá při obrábění tvrdých materiálů s větší objemovou hmotností. Při volbě úhlu břitu je ovšem většinou potřeba vycházet primárně z hodnot úhlů α a γ. Současně je velikost úhlu taky podmíněna materiálem břitu, kdy u SK se z důvodu jeho křehkosti volí úhel β větší než u nástrojové oceli (Fiala a Chrást, 1983; Prokeš, 1982; Prokeš, 1984).

- **Úhel čela γ**

Úhel γ definuje úhel čela, kdy čelo je plocha, po níž klouže tříska. Je to úhel svíraný čelní plochou a rovinou rovnoběžnou se základní rovinou, která prochází bodem řezné hrany. Tento úhel má vliv na vlastnosti třísky, tedy na její tvorbě a odvádění, kdy vzniká tření třísky o čelo nástroje. Pokud je úhel čela příliš velký, je tím pádem úhel břitu příliš malý a dochází tím ke snižování trvanlivosti břitu (Fiala a Chrást, 1983; Prokeš, 1984; Varkoček et al., 2004).

Úhel čela bývá většinou kladný, ale může být i nulový, popřípadě nabývat záporných hodnot. Záporných úhlů čela se využívá například při příčném řezání, nebo, jak již bylo zmíněno, při řezání umělého kamene (Prokeš, 1982).

- **Úhel řezu δ**

Úhle řezu je součet úhlu hřbetu a břitu, tedy $\alpha + \beta = \delta$. Tento úhel má vliv na deformaci materiálu v místě styku nástroje s materiálem a také na tvorbu třísky. S rostoucím úhlem řezu se zvětšují plastické deformace v oblasti tvorby třísky, tření na čele nástroje a současně také roste řezný odpor, jehož následkem je intenzivnější otupování břitu. Naopak při zmenšování úhlu δ dochází při konstantním úhlu α ke snižování pevnosti a tuhosti břitu a hrozí nebezpečí vylomení. Úhel řezu se volí podle typu obrobku a běžně se volí v přibližném rozmezí 12–120°, kdy větší úhel se používá pro pevnější materiály. Pokud je úhel řezu δ větší než 90°, je úhel čela γ záporný a tříska se neodřezává, ale odškrabává. Toho se využívá při obrábění materiálů

s pevností větší než 1000 MPa, a to především u nástrojů s SK břity (Fiala a Chrást, 1983; Prokeš, 1982; Prokeš, 1984; Varkoček et al., 2004).

4.3 Úpravy těla pilového kotouče

Z důvodu negativního vlivu vibrací pilových kotoučů na výslednou kvalitu řezné spáry během procesu řezání je žádoucí tento faktor co nejvíce eliminovat. Pro tento účel existuje řada konstrukčním úprav kotoučů, které kromě nežádoucích vibrací také snižují hlučnost (Hlásková, 2011).

4.3.1 Úprava předpětím

Tato konstrukční úprava má za následek vyrovnání pnutí v těle pilového kotouče, které vzniká následkem třecího tepla (Hlásková, 2011).

- **Úprava předpětí kladivem**

Úprava předpětí pomocí kladiva je starší metoda pro snížení pnutí kotouče a je prováděna ručně na kovadlině s kladivem s kulatou ploškou. Údery kladiva by se měly provádět stejně z obou stran kotouče, a to stupňovitě od středu kotouče ke kraji (Hlásková, 2011).

- **Úprava předpětím válcováním**

Tato úprava se provádí z důvodu snížení napětí v tlaku na okraji kotouče pro zvýšení dynamické stability při samotném procesu řezání. Úprava se provádí na válcovacích strojích, na kterých se kotouče lokálně stlačují mezi dvěma rotujícími tlačnými kladkami, a dochází k válcování proužku vzdáleného jednu stopu od středu kotouče (Javorek, 2006; Hlásková, 2011).

4.3.2 Odhlučňovací drážky

Jak již naznačuje název této úpravy, její účel je snížení hlučnosti kotouče v procesu řezání, a to dle výrobců až o 8 dB. Je to moderní metoda používající se na kotouče s SK břity, při které dochází k vypálení drážek délky $2 \cdot R$ do těla kotouče za pomocí laseru (Obr. 26). Běžně se vypaluje tři a více drážek, jejichž cílem je především při chodu na prázdno eliminovat pískání a deformace těla kotouče (Hlásková, 2011).

Obr. 26 Ukázka odhlučňovacích drážek na pilovém kotouči CMT

4.3.3 Měděné nýty

Měděné nýty se používají z důvodu snížení vibrací, a to díky rozdílné tepelné roztažnosti a jiných mechanických vlastností mědi, než tělo pilového kotouče. Umisťují se na obvod pilového kotouče na konec vypálené radiální drážky (Obr. 27) a mimo snížení vibrací také ovlivňují zvýšení kritických otáček (Hlásková, 2011).

Obr. 27 Ukázka měděných nýtů na pilovém kotouči AKE

4.3.4 Otvory v těle pilového kotouče

Pro zvýšení tuhosti pilového kotouče lze použít tuto metodu, při které se ve výrobě do těla vypalují otvory laserem, díky čemuž dochází ke snížení napětí v okrajové části kotouče. Výsledkem je zklidnění pilového kotouče společně se snížením vibrací a hlučnosti, a to při pracovních otáčkách až o 5 dB (Hlásková, 2011).

4.4 Řezání pilovými kotouči

Proces řezání pilovými kotouči lze rozdělit podle druhu řezání (podélné a příčné) a také podle posuvu, tedy zda se posouvá obráběný materiál (při podélném řezání), nebo

je posouván samotný nástroj (některé případy příčného řezání). Důležitým vlivem na proces řezání je řezná rychlost (počet otáček kotouče), jejímž zvyšováním při daném průměru a počtu zubů kotouče lze současně zvyšovat i minutový posuv při stejném posuvu na zub. Pro jistou eliminaci chyb v přípravě a upnutí řezného nástroje lze zvýšit řeznou rychlost při stejném minutovém posuvu, díky čemuž dochází ke snižování posuvu na zub. Současně ale v tomto případě dochází k negativnímu rychlejšímu otupování ostří nástroje, což je způsobeno zvětšením celkové délky třísky odebrané jedním břitem na určitou délku obráběného materiálu. Nevýhodou vyšších řezných rychlostí je také vyšší hlučnost a nebezpečí u tenkých kotoučů, že se dostanou do blízkosti kritických otáček, které negativně ovlivňují proces řezání. Obecně jsou nejvyšší dovolené otáčky uváděny výrobci pilových kotoučů (Prokeš, 1984).

4.4.1 Upínání pilových kotoučů

Upínání pilových kotoučů ovlivňuje nejen přesnost procesu obrábění, ale současně má vliv i na produktivitu a hospodárnost tohoto procesu. To vychází ze základních požadavků na pilové kotouče, jako je minimální kmitání při řezání, eliminace nestabilního chodu, snížení namáhání hřídele a ložisek a snížení hlučnosti. Při naplnění těchto požadavků pak následně dochází ke zmenšení nezbytných nadmír obrobků, což má pozitivní vliv na výtěžnost obráběného materiálu, a výsledkem jsou větší výnosy (Fiala a Chrást, 1983; Prokeš, 1984).

Upínací zařízení musí primárně vykazovat dostatečnou tuhost, aby bylo schopné zachytit vznikající řezné síly a současně by měla dle Javorka (2006) plnit tyto základní funkce:

- přenášet výkon z hnacího elektromotoru na pilový kotouč, a tím umožnit samotné řezání,
- omezovat příčné neboli axiální kmitání kotouče.

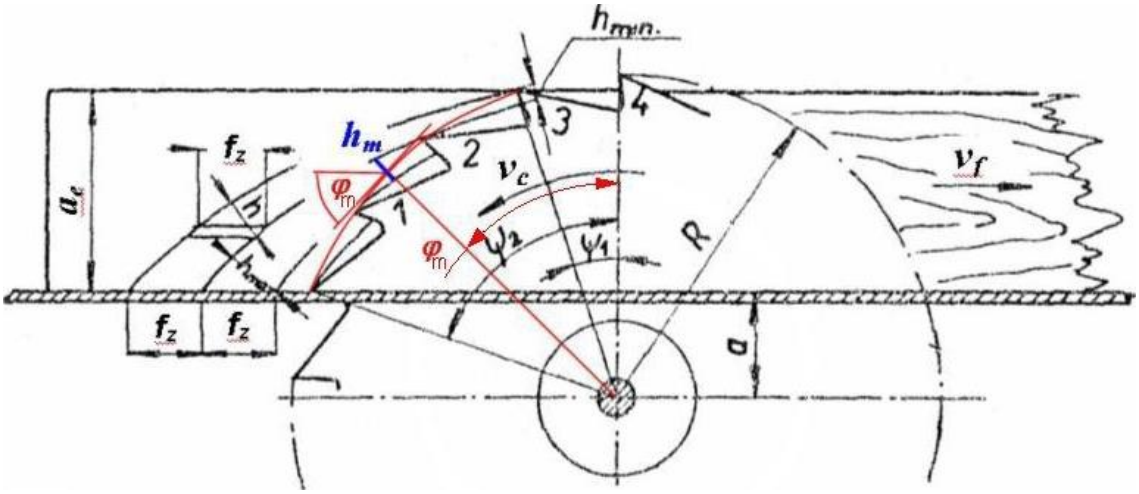
Pilové kotouče lze na vřeteno hřídele upínat mnoha způsoby, kdy mezi nejčastější patří mezi dvě příruby. Příruby pak mohou být různého druhu – bez protismykových kolíků, se zajišťovacím kolíkem proti přesmyknutí, s úpravou na snížení vibrací, se středícím pouzdrem a pružinou, nebo s pojistnou talířovou pružinou. Pilové kotouče lze také upevnit bez přírub, a to buď mezi vymezovací pouzdra, nebo na čelo hřídele (Javorek, 2006).

4.4.2 Rozvírací klíny

Úkolem rozvíracích klínů je při rozřezávání odklánět odřezávanou část obrobku a především držet otevřenou rozříznutou drážku, aby nedošlo k situaci, kdy se drážka pnutím v materiálu sevře, zadní část kotouče zachytí obrobek, zrychlí jej a vrhne proti obsluze. Dle normy ČSN 49 6105 by měla být tloušťka rozvíracího klínu o 0,1 až 0,3 mm menší, než je samotná tloušťka plochého pilového kotouče (Prokeš, 1982; Nutsch, 2006).

4.4.3 Kinematika obrábění

Dosahování požadovaného tvaru součástky obráběním je založené na oddělování materiálu polotovaru řezným nástrojem. Ostří pilového kotouče se pohybuje konstantní řeznou rychlostí po kruhové dráze. Tento rotační pohyb pilového kotouče se při řezání skládá s přímočarým pohybem obrobku, z čehož vychází dráha řezného zubu ve tvaru cykloidy. Jelikož je ale řezná rychlost velká v porovnání s rychlostí posuvu obrobku, což znesnadňuje výpočet tloušťky třísky, bývá úsek řezné dráhy břitu považován za kruhový oblouk (Prokeš, 1982).



Obr. 28 Kinematika řezání rostlého dřeva pilovým kotoučem (Kopecký et al., 2008)

Zmíněné pohyby nástroje a obrobku jsou řešeny pomocí kinematiky obrábění a dají se vyjádřit základními vztahy (Varkoček et al., 2004):

- **Posuvná (podávací) rychlost**

$$v_f = f_z \cdot n \cdot z \qquad [\mathrm{m \cdot min^{-1}}] \qquad (2)$$

- **Řezná rychlost** (pro pilové kotouče)

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \qquad [\mathrm{m \cdot s^{-1}}] \qquad (3)$$

- **Posuv na zub**

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \qquad [\mathrm{mm}] \qquad (4)$$

4.4.4 Jakost řezné spáry

Na jakost řezné spáry mají v procesu řezání pilovými kotouči vliv kinematické nerovnosti kotouče, nerovnosti způsobené vibracemi kotouči a také nepřesnosti rozvodu zubů. Velikost kinematických nerovností bývá v řádech mikrometrů a nemá takový vliv na jakost jako třeba řádově vyšší nerovnosti způsobené nepřesnostmi v rozvodech zubů. Největší negativní vliv na kvalitu mají osové výchylky pilového kotouče, které bývají v řádu desetin milimetrů. Tyto výchylky bývají způsobeny samotným stavem stroje (kolmost přírub k ose otáčení, přesnost ložisek), rovinností a tuhostí kotouče a způsobem vedení obrobku ve stroji (Prokeš, 1982).

Obecně lze říci, že dosáhnutí dobré kvality řezné spáry je podmíněné kontrolou dosavadních řezných podmínek a správné přípravy a upnutí řezného nástroje. Příkladem může být zmenšení házivosti upínacích přírub, rovnání kotouče pomocí úpravy pnutím nebo použití pilových kotoučů s SK břity, které mají oproti nástrojové oceli 30–50násobně vyšší trvanlivost ostří. Na kvalitu řezu má také vliv řezná rychlost, u které lze obecně říct, že má vliv na hospodárnost použití řezného nástroje (Prokeš, 1982; Prokeš, 1984; Nutsch, 2006).

V případech, kdy je žádoucí vysoce kvalitní řezná spára (např. z důvodu eliminování následného frézování), lze využít některých postupů, které se týkají správné přípravy a upnutí nástroje. Jedná se například o egalizaci boků zubů za chodu nástroje sbrušováním pomocí obtahovacího kamene, kde je ovšem potřeba dodržet kolmost roviny kotouče k ose otáčení, aby nedocházelo k nestejnoměrnému obrušování. Dále pak lze vysoce kvalitního řezu dosáhnout různými typy zubů, a to buď jejich použitím jen na určitých místech kotouče (hoblovací zuby), nebo speciálními způsoby ostření (např. Lundbergovo a Robstovo ozubení). V neposlední řadě lze kvalitu zvýšit použitím podbroušených (hoblovacích) pilových kotoučů, u kterých je rozvod nebo pěchování nahrazeno radiálním zúžením těla kotouče (Prokeš, 1982).

Na velikost drsnosti a vlnitosti (viz kapitola 6.1) obrobeného povrchu má vliv mnoho činitelů, jako například způsob oddělování třísky, který vychází ze způsobu obrábění, geometrie nástroje a také z nepřesností chodu nástroje. Déle jsou tyto odchylky od ideálně rovného povrchu ovlivněny řeznými podmínkami (posuv na zub, řezná rychlost, tloušťka třísky apod.), mikrogeometrií ostří (míra otupení) a samotnými vlastnostmi obráběného materiálu (Javorek, 2006).

Pro správnou jakost řezné spáry je také mimo jiné potřeba dodržovat správné přesahy pilových kotoučů, jejichž hodnoty v závislosti na průměru pilového kotouče jsou uvedeny v Tab. 9. Mimo jiné nemá přesah pilového kotouče nad obrobkem při použití daného kotouče žádný vliv na celkovou řeznou sílu (Prokeš, 1982; Prokeš, 1984).

Tab. 9 Přesah pilového kotouče nad obrobkem *p* v závislosti na průměru pilového kotouče *D* (Prokeš, 1984)

D	[mm]	200–300	300–400	400–500	500–600
p	[mm]	5–10	10–15	15–18	18–22

4.4.5 Vibrace pilových kotoučů

Vibrace pilových kotoučů jsou negativním jevem, který může provázet proces řezání. Toto nežádoucí kmitání má za následek zhoršení řezné spáry, z čehož vyplývají i větší ztráty materiálu, opotřebování a nadměrné zahřívání pilových kotoučů nebo také například vyšší hlučnost. Nejčastěji jsou následkem nepřesné konstrukce či chyb vznikajících při výrobě samotného pilového kotouče, nicméně mohou být také důsledkem přenosu kmitání jiných částí obráběcího stroje (např. ložiska nebo hřídele) na pilový kotouč. V případě, že jsou vibrace způsobovány přímo kotoučem, je to většinou způsobeno nestejnou tloušťkou těla kotouče, vnitřním napětím, prohnutím nebo chybným upnutím na hřídeli stroje. Pokud nastane situace, kdy je frekvence vibrací stroje shodná s frekvencí vibrací pilového kotouče, začnou vznikat kritické vibrace. Kritické vibrace je možné určit z počtu rezonančních uzlů *k*, tzv. Chladného obrazce (Ernst Chladni – německý fyzik) (Javorek, 2006).

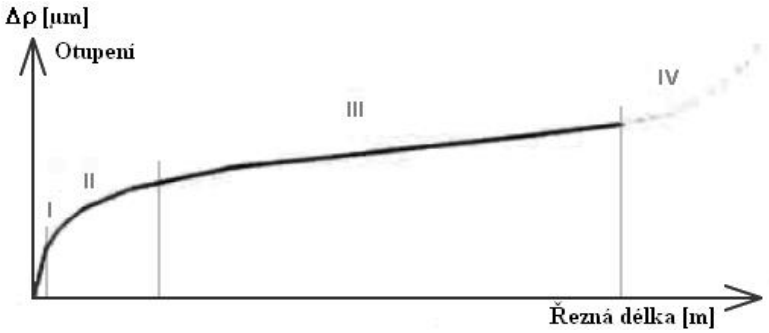
4.5 Proces otupování břitu

Při obrábění dochází k postupnému otupování břitu nástroje, což má vliv na kvalitu výsledného povrchu, a tento proces lze definovat jako postupnou změnu mikrogeometrie břitu v průběhu řezání. Nástroj během tohoto procesu ztrácí schopnost řezat. Nástroj je tupý ve chvíli, kdy kvůli němu nastává nepřijatelné zhoršení kvality obrobeného povrchu s rozměrovými nepřesnostmi a dochází k nárůstu řezné síly i pálení. Tento proces lze charakterizovat především skrz životnost a trvanlivost břitu (Prokeš, 1984; Varkoček et al., 2004).

Samotné otupování nástroje je způsobeno účinkem mechanických a fyzikálně-chemických procesů, ke kterým dochází mezi kontaktními plochami řezného klínu a materiálu, který ho obtéká. Mikrogeometrie břitu se během tohoto procesu mění v závislosti na druhu materiálu nástroje, typu obrábění, tloušťky třísky, řezných úhlů a druhu materiálu obrobku, včetně jeho vlastností (Javorek, 2006).

Mechanické opotřebování se projevuje oddělováním částiček řezného nástroje v případě, že jsou vnější síly, kterými na sebe působí nástroj a obrobek, větší, než síly vázající tyto částičky navzájem. Při fyzikálně-chemickém opotřebování primárně dochází ke změně chemického složení povrchové vrstvy slinutých karbidů v místě styku s obrobkem. To má většinou za následek změnu mechanických vlastností SK, jako například i odolnost proti oděru. V jistých případech může dokonce dojít k rozpuštění strukturní složky nástrojového materiálu v samotném obrobku (Javorek, 2006).

Proces otupování břitu lze rozdělit do čtyř fází, viz Obr. 29. Fáze I zobrazuje první záběr břitu, odstranění jehly (nebo odlomení velmi jemného ostří) a otřepů a je vyšší u menších úhlů břitu. Ve fázi II prudce roste otupení s klesajícím průběhem a přechází do třetí lineární fáze, která je fází rovnoměrného otupování. V této fázi se křivka stává lineární a dochází ke stabilizaci procesu, kdy změny v mikrogeometrii břitu probíhají zpravidla mnohem pomaleji. V poslední fázi IV narůstá otupení s utlumujícím průběhem, což ale není experimentálně prokázáno. Takto popsaný průběh otupování platí pro břity z nástrojové oceli a slinutých karbidů a stelitů (Prokeš, 1982; Prokeš 1984; Varkoček et al., 2004).



Obr. 29 Proces otupování břitu (Varkoček et al., 2004)

Z důvodu dosahování žádoucí kvality při obrábění je potřeba ostří obnovovat. Správně nabroušené ostří může dle Varkočka et el. (2004) pozitivně ovlivňovat řezný proces a eliminovat nepříznivé projevy tohoto procesu, jako např.:

- snižování stability nástroje,
- nepřesnost rozměrů obrobku,
- zhoršení povrchové jakosti výrobku,
- pálení obráběného povrchu,
- pokles otáček a tím i řezné rychlosti,
- změnu jakosti třísek,
- vyštípání materiálu na výstupní hraně nebo
- třepení okrajů aj.

Otupení řezného nástroje lze zjistit s větší či menší přesností pomocí mnoha metod. Mezi tyto metody patří např. metoda váhová, příčného řezu, proužková, pomocí váhadel a radioizotopů. Mimo jiné lze ostrost řezné hrany zjistit ze změny nějakého jiného parametru, jako změny kvality řezu, spotřeby energie nebo teploty nástroje (Javorek, 2006).

4.5.1 Trvanlivost a živostnost břitu

Z důvodu dosáhnutí optimální hospodárnosti obrábění z hlediska trvanlivosti a životnosti nástroje a současně z hlediska produktivity práce, je potřeba volit vhodné řezné podmínky. Ty se stanovují v závislosti na vlastnostech stroje (včetně výkonu

hnacího elektromotoru) a nástroje, a také z požadavků na jakost a přesnost obráběného povrchu (Fiala a Chrást, 1983).

Trvanlivost ostří je charakterizována dobou, po kterou řezný nástroj pracuje a dosahuje optimální jakosti řezu. Vyjadřuje se jednotkami časovými (pouze dobou, kdy je ostří v záběru) a délkovými (řeznou dráhou). Na trvanlivost ostří mají vliv vlastnosti obráběného materiálu a nástroje (spolu s geometrií břitu nástroje), řezná rychlost (neboli obvodová rychlost) břitu nástroje, velikost posuvu, způsob chlazení a hloubka třísky. Trvanlivost břitu se nejvíce snižuje rostoucí řeznou rychlostí nad optimální hodnotu, a méně pak zvětšováním posuvu. Nejméně trvanlivost břitu snižuje zvětšování tloušťky odebírané vrstvy. V případě několikabřitých nástrojů je trvanlivost závislá na trvanlivosti jednotlivých břitů, pokud je ovšem dodržen předpoklad, že jsou všechny břity zatěžovány stejnoměrně (Fiala a Chrást, 1983; Prokeš, 1982; Prokeš, 1984).

Životnost nástroje je charakterizována násobkem trvanlivosti ostří (kolikrát je možné ostří přebrousit) a vyjadřuje se pomocí času a délkových jednotek. Hranice životnosti nástroje je vyjádřena ukončením požadované schopnosti plnit svou funkci (Fiala a Chrást, 1983; Prokeš, 1982; Prokeš, 1984).

5 OBRÁBĚNÍ VYSOKOTLAKÝM VODNÍM PAPRSKEM

Tato technologie obrábění materiálů, jinak také hydroabrazivní obrábění neboli Water Jet Machining (WJM), využívá abrazivních účinků vysokoenergetického vodního (kapalinového) paprsku. Původně byla tato technologie vyvinuta v USA při stavbě vesmírných lodí pro zpracování netradičních nekovových materiálů o vysoké pevnosti a tvrdosti a v současnosti nachází uplatnění v mnoha průmyslových oborech díky svému univerzálnímu použití (Morávek, 1999).

Vodní paprsek využívá tlaku kapaliny stejně jako vodovodní potrubí, jen s tím rozdílem, že tlak je zde extrémně zvýšen na několik set MPa (200–600 MPa), díky čemuž jím lze obrábět jakýkoliv technický materiál. Paprsek většinou tvořený upravenou vodou vytéká z pevné safírové trysky (tryska může být i ze slinutého karbidu, rubínu nebo diamantu) o průměru 0,25 až 2 mm, pod kterou se pohybuje stůl s obráběným materiálem, pod kterým je vodní nádrž. Rychlost paprsku je dvojnásobně až čtyřnásobně vyšší než rychlost zvuku (700–1200 m/s), z čehož vychází úvaha, která tvoří fyzikální podstatu této technologie, že takovýto paprsek lze z hlediska jeho účinků považovat za pevné těleso (Karafiátová a Langer, 1998; Valíček a Hloch, 2008).

Pro větší řezný výkon vodního paprsku se využívá příměsi brusiva neboli abraziva, které se s vodou mísí ve speciálně tvarované směšovací otěruvzdorné komoře a na které se přenáší hybnost samotného vodního paprsku. Abrazivum může být tvořeno karbidem křemíku (SiC), diamantovým prachem, elektrokorundem (Al_2O_3) nebo přírodním brusivem (jemně mletý granát, smirek) a jeho spotřeba je přibližně 1 kg/min. Druh použitého abraziva ovlivňuje zejména životnost trysek (Karafiátová a Langer, 1998; Valíček a Hloch, 2008).

Z výše uvedených informací plyne základní rozdělení této technologie obrábění na řezání:

- **čistým vodním paprskem** (lamináty, papír, lepenka, gumotextil atd.),
- **vodním paprskem s abrazivem** (beton, oceli, tvrdé kovy, vrstvené kompozity, sklo atd.) (Karafiátová a Langer, 1998; Valíček a Hloch, 2008).

Kromě samotného dělení (tvarového řezání) materiálu lze vodní paprsek využít i na děrování, výrobu drážek a zápichů, soustružení, leštění, gravírování nebo odstraňování otřepů (ČSVTS, 1987).

5.1 Výhody a nevýhody obrábění vysokotlakým vodním paprskem

Tato nekonvenční technologie obrábění vyniká řadou výhod, díky čemuž nachází uplatnění v celé řadě průmyslových odvětví. To je dáno velkou variabilitou řezaného materiálu, kdy je možné řezat i vrstvené a kompozitní materiály s odlišnými fyzikálně-chemickými vlastnostmi (měkké a lepivé či drolící se a křehké), a to i tvarově složité nebo zvlněné. Obecně mezi vhodné materiály k řezání patří např.:

- ocel (konstrukční, nástrojová, kalená, nerezová),
- neželezné kovy a jejich slitiny (hliník, titan, měď, nikl…),
- sklo (čiré, barevné, vrstvené, upravené), keramika (včetně glazury),
- přírodní a umělý kámen,
- plasty (včetně čirých a vrstvených)
- kompozitní materiály,
- masivní dřevo, dřevotřísku, lamino, překližku,
- pěnové materiály, pryže, kůže, koženku, koberce, textilie, papír,
- tepelněizolační a elektroizolační hmoty,
- reklamní materiály (řezání písmen a logotypů) (Řežeme vodou, 2011).

Řez je vysoce přesný, kvalitní bez otřepů, neporušuje povrchové úpravy (leštění, broušení…) materiálu a obvykle nevyžaduje žádné další opracování. Při obrábění také dochází k minimálním ztrátám obráběného materiálu (0,1 mm u čistého vodního paprsku; cca 1 mm bez otřepů u abrazivního paprsku). Odpad lze také eliminovat těsnou blízkostí trysky od obrobku. Současně materiál není nijak chemicky ovlivňován ani tepelně namáhán, díky čemuž nedochází ke vzniku vnitřního pnutí a změnám struktury.

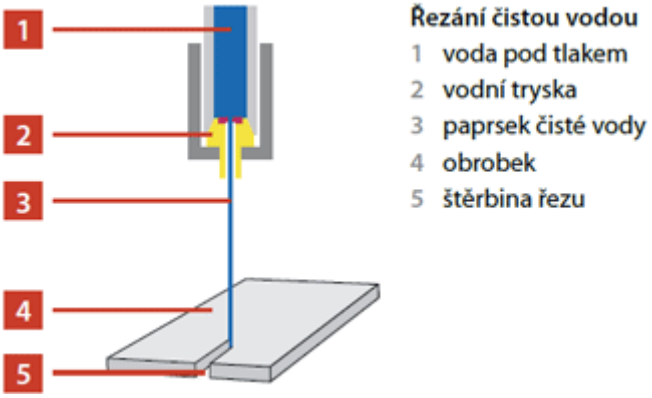
Při řezání nedochází ke vzniku emisí a polétavého prachu, což je příznivé jak pro samotné pracovní prostředí, tak i pro úsporu nákladů na pořízení a provoz vzduchotechniky. Tato technologie je také relativně vysoce energeticky účinná (cca 50 %), šetrná k životnímu prostředí a může být plně automatizovaná. Lze využít i ve výbušném prostředí nebo přímo na řezání výbušných hmot (Karafiátová a Langer, 1998; Valíček a Hloch, 2008; Řežeme vodou, 2011).

Nevýhodou tohoto způsobu dělení materiálů je vysoká pořizovací cena i vysoké náklady na provoz oproti konvenčním technologiím obrábění. U vodního paprsku s příměsí abraziva je také nevýhodou relativně nízká rychlost posuvu řezné hlavy u "tvrdých" materiálů a velmi vysoká hlučnost (více jak 100 dB) (Valíček a Hloch, 2008).

Z důvodu práce s vodou je také nevýhodou delší vysoušení u nasákavých materiálů a možná změna barev nebo znečištění některých materiálů. Současně dochází k nezbytnému kontaktu vody s obráběným materiálem, kvůli čemuž je potřeba vhodně ošetřit kovové materiály (Řežeme vodou, 2011).

5.2 Čistý vysokotlaký vodní paprsek

Vysokotlakým vodním paprskem bez příměsi abraziva (WJM – Water Jet Machining) (Obr. 30) lze zpracovávat materiály menších tlouštěk, které ale mohou vynikat vysokou pevností. K dělení materiálu čistým vodním paprskem dochází v závislosti působení tlaku kapaliny na obráběný materiál, kdy v první fázi dochází ke vzniku prohlubně, která se následně mění v otvor. Ve druhé etapě se poté otvor prohlubuje a vzniká řezná spára. Při střetu vodního paprsku s obráběným materiálem dochází k jevu, kdy se vysoký tlak akumuluje na velmi malé ploše, což má za následek vznik rázových vln v obrobku. Materiál na hranici zrn podléhá rychlé destrukci a vznikají mikrotrhliny, které se rychle šíří, což má za následek rozrušování obrobku. Tato destrukce je také způsobena vlivem turbulentního proudění kapaliny ve vzniklé spáře. Pracovní kapalina je primární faktor ovlivňující efektivnost technologie a z globálního hlediska je nejčastěji používaná voda, která splňuje technické požadavky, je nejdostupnější, nejlevnější a ekologická (ČSVTS, 1987; Valíček a Hloch, 2008).



Obr. 30 Schéma řezání čistým vysokotlakým vodním paprskem

Základní parametry vodního paprsku bez příměsi abraziva jsou dle Morávka (1999):

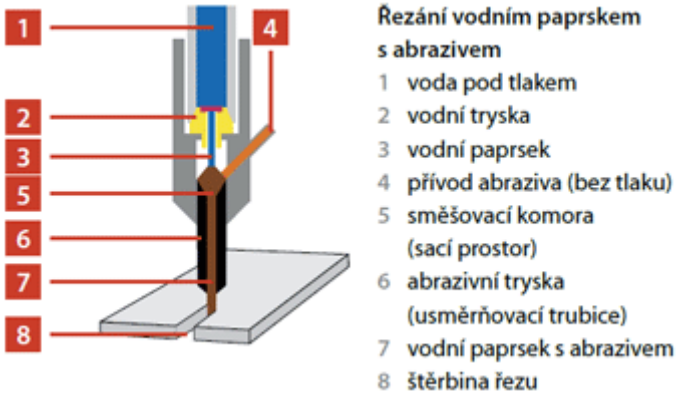
- pracovní tlak vody — p = 60–400 MPa
- průměr vodní trysky — d_n = max. 0,3 mm
- množství vody — Q = max. 2,8 l/min
- vzdálenost trysky od materiálu — A = 2–70 mm

5.3 Vysokotlaký vodní paprsek s příměsí abraziva

Vodní abrazivní paprsek (AWJ – Abrasive Water Jet Machining) funguje na stejném principu jako čistý vodní paprsek jen s tím rozdílem, že jsou do paprsku přidána brousicí zrna, tudíž je efekt umocněn o abrazivní účinek těchto zrn (Obr. 31). Spolupůsobením této kapalné a pevné fáze dochází k úběru materiálu následkem erozivního neboli hydroabrazivního působení. Pracovní kapalina musí být správně filtrována, jelikož kvůli přítomnosti pevných částic dochází k opotřebování všech částí zařízení a ucpávání ventilů, deionizována apod. (Valíček a Hloch, 2008).

Ke smíchání abraziva s čistým vodním paprskem dochází ve specifické tzv. směšovací komoře v řezné hlavě, kde vzniklý podtlak přisává brousicí zrna ze zásobníku. Abrazivum je urychlováno paprskem a po průchodu tzv. zaostřovací trubicí vytváří abrazivní kapalinový paprsek. Samotný výběr vhodného abrazivního materiálu podléhá volbě kompromisu mezi různými faktory, jako je tvrdost (tvrdší jsou účinnější, ale naopak rychleji opotřebovávají zaostřovací trubici), velikost (menší částice zajišťují nižší drsnost povrchu, ale prodlužují čas zpracování), tvar (kulatější

zrna zajišťují nižší drsnost povrchu, ale nižší hloubku řezu), hmotnostní tok, ekologičnost a cena (Valíček a Hloch, 2008). Jako abrazivum se používají přírodní i syntetické materiály o zrnitosti 0,2–0,5 mm a mohou jim být např. křemičitý písek, který se využívá při výrobě skla, korundová nebo SiC zrna, ze kterých se vyrábí brusné nástroje, nebo i granát, olivín a další. (Morávek, 1999).



Obr. 31 Schéma řezání vysokotlakým vodním paprskem s příměsí abraziva

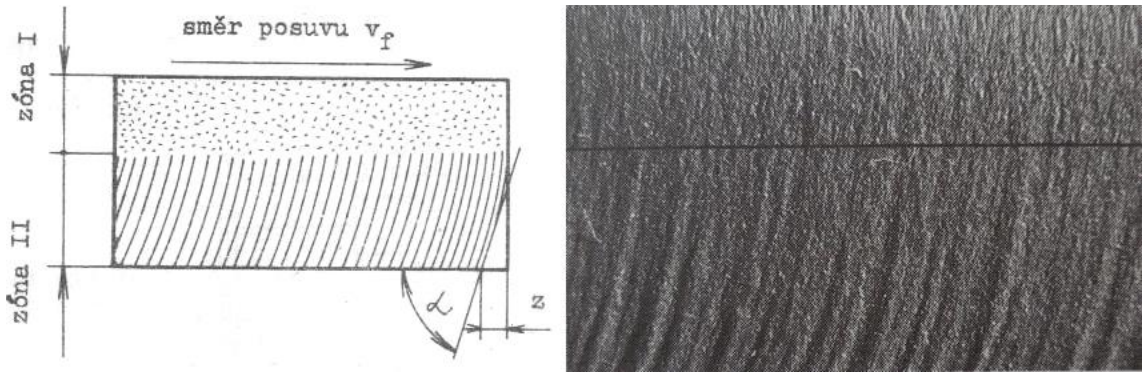
Směšovací komora a výstupní tryska musí při této technologii odolávat vysokým abrazivním účinkům, proto bývá vyráběna z karbidu wolframu, keramických materiálů na bázi korundu či kubického nitridu bóru (Morávek, 1999).

Základní parametry vodního paprsku s příměsí abraziva jsou dle Morávka (1999):

- pracovní tlak vody $p = 200–300$ MPa
- průměr vodní trysky $d_n \geq 0{,}25$ mm
- množství vody $Q = 2–6$ l/min
- množství abraziva $M = 0{,}2–1{,}5$ kg/min
- průměr výstupní trysky $d_m = 0{,}8–2$ mm
- vzdálenost trysky od materiálu $A = 2–10$ mm

Na Obr. 32 je zobrazen obrobený povrch vodním abrazivním paprskem, kde jsou viditelné 2 zóny na ploše řezu. Zóna I je na straně vstupu paprsku do materiálu, je hladká a vykazuje matný vzhled. Drsnost povrchu v zóně I je $R_a = 2{,}0–5{,}5$ µm. Zóna II je na straně výstupu paprsku, kde paprsek ztrácí svoji kinetickou rychlost a vychyluje se. Zóna II je typická svým žlábkováním, kde je délka vlny 1–2 mm,

a výška nerovností je v extrémních případech až 0,8 mm. Tlak pracovní kapaliny, vzdálenost trysky od povrchu materiálu a rychlost řezání ovlivňuje absolutní i poměrnou šířku obou výše uvedených zón. Pro hodnocení procesu obrábění má také význam úhel α, který určuje úhel výstupu paprsku, a hodnota zpoždění paprsku *z* (Barcal, 1989).



Obr. 32 Zóny obrobeného povrchu (Barcal, 1989; Valíček a Hloch, 2008)

Ve srovnání s řezáním laserem je obrábění vysokorychlostním abrazivním paprskem energeticky účinnější v poměru až 85 % ku přibližně 10 % při poměrně nízké energetické náročnosti (maximální příkon je u paprsku 25–40 kW). Předností je také vysoká ekologická a hygienická úroveň pracoviště, kdy odpadá problém s prašností při obrábění azbestů a materiálů typu skelných laminátů, které jsou karcinogenní a jedovaté. Současně tato metoda dělení materiálů není tolik citlivá na vzdálenost trysky od povrchu obrobku, díky čemuž je možné řezat také zvlněné materiály. Výhodou je také nulové tepelné ovlivňování povrchu, díky čemuž nevzniká zbytkové pnutí v obrobené ploše (Barcal, 1989).

6 METODY HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU

Kontrola kvality povrchu u všech typů technologií, které ji vytváří, tvoří v současnosti významnou součást přípravy povrchu. Od roku 1930, kdy vznikaly první přístroje pro měření topografie povrchu, proběhl velký pokrok jak v samotných metodách, tak i v měřicích přístrojích. V šedesátých letech se začaly uplatňovat digitální metody, které byly výchozí technologií pro možnost hodnocení jakosti povrchu 3D metodou. Jelikož je kontrola kvality povrchu důležitá pro určení funkčnosti povrchu, je řízena normami (Valíček a Hloch, 2008).

Metody hodnocení kvality povrchu neboli topografické metody, které povrch předmětu popisují kvantitativně a kvalitativně, můžeme rozdělit dle dvou základních kritérií:

- Podle kvantitativní míry popisu hodnoceného předmětu:
  - **2D měření** – výstupem je mapa n bodů povrchu s kartézskými souřadnicemi x_n a, y_n, které popisují tvar a rozměr předmětu v ploše.
  - **3D měření** – výstupem je mapa n bodů povrchu s kartézskými souřadnicemi x_n, y_n a z_n, které popisují množinu bodů nesoucí navíc informaci o topografické výchylce předmětu z_n.
- Podle principu samotného měření:
  - **Bezkontaktní metody**: zprostředkovaný kontakt s hodnoceným objektem.
  - **Kontaktní metody**: přímý kontakt přístroje s hodnoceným objektem (Mandát, 2012).

6.1 Základní pojmy struktury povrchu

Následující pojmy jsou čerpány primárně z norem ČSN EN ISO v kombinaci s literaturou. Z důvodu velkého množství pojmů jsou vybrány pouze ty, které souvisí s obsahem této diplomové práce.

- **Struktura povrchu a skutečný povrch**

Strukturou povrchu jsou myšleny opakované nebo náhodné úchylky od geometrického povrchu, které tvoří 3D topografii povrchu. Strukturu povrchu tvoří drsnost, vlnitost, stopy po obrábění, nedokonalosti a úchylky tvaru na omezené ploše povrchu. Skutečný povrch je takový, který omezuje těleso a odděluje ho od okolního prostředí (ČSN EN ISO 8785:1998, 2000).

- **Typy nedokonalostí povrchu**

Prohlubeniny jsou nedokonalosti povrchu orientované dovnitř materiálu.

Rýhy jsou délkové prohlubeniny se zaobleným nebo plochým dnem.

Škrábance jsou nepravidelné prohlubeniny neurčitého směru.

Trhliny jsou délkové prohlubeniny s ostrým dnem způsobené narušením celistvosti povrchu a základního materiálu součásti (ČSN EN ISO 8785:1998, 2000).

- **Drsnost**

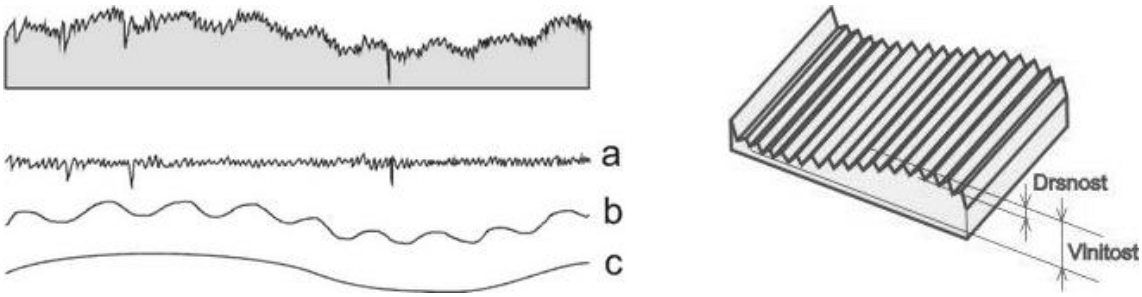
Drsnost povrchu neboli základní parametr *R* (Obr. 33, a)představuje nejmenší nerovnosti vznikající v procesu výroby (např. působením řezného nástroje nebo brousícího zrna). Je spíš následkem dokončovacích technologií než působením obráběcího stroje a stopy mohou být uspořádány periodicky nebo náhodně. Drsnost je obecně závislá na vzájemném relativním postavení nástroje s obrobku, spolu s ostřím použitého nástroje. Vlivem působení "odtrhávání" mikročástic materiálu při obrábění, zbytků nárůstků na břitu a malých vad na špičce nástroje vznikají i jemnější složky struktury povrchu (Dudarev, 2010; Hlásková, 2011).

- **Vlnitost**

Vlnitost nebo základní parametr *W* (Obr. 33, b) představuje rozměrnější nerovnosti, na které je superponována drsnost, a nejčastěji vzniká v důsledku kmitání nebo deformace obrobku, popřípadě v důsledku pnutí v materiálu. Především je vlnitost přisuzována vlastnostem obráběcího stroje a nástroje, kdy příkladem může být nevyváženost a nepřesnost seřízení nástroje, nedostatečná tuhost stroje, nepřesnost vodících šroubů, házivost hřídele apod. (Kučera, 2008; Hlásková, 2011).

- **Tvar**

Tvar neboli základní parametr *P* (Obr. 33, c) je definován největšími nerovnostmi povrchu, které vznikají bez ohledu na drsnost a vlnitost. Úchylky tvaru povrchu jsou nejčastěji způsobovány nedostatečným upnutím obráběných součástí, nepřímost vodících ploch strojů nebo deformace součásti při vyšších teplotách obrábění (Kučera, 2008; Hlásková, 2011).



Obr. 33 Profil povrchu – drsnost (a), vlnitost (b), tvar (c) (Kučera, 2008; Hlásková, 2011)

Tyto typy nerovností (drsnost, vlnitost, tvar) se ovšem nikdy neobjevují samostatně, ale pokaždé v jisté kombinaci, kdy každý typ nerovnosti se hodnotí a měří zvlášť. K tomu slouží různé typy filtrů, díky kterým umí měřicí přístroje rozčlenit strukturu povrchu na části podle rozteče nerovností (Kučera, 2008; Hlásková, 2011).

- **Filtr profilu**

Je to filtr rozdělující profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky. Pro měření drsnosti se v přístrojích používají tři filtry, které mají stejné přenosové charakteristiky ale rozdílné hodnoty mezní vlnové délky cut-off:

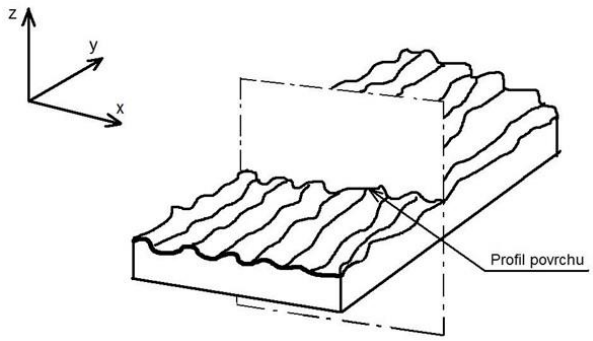
λs…filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu,

λc…filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti,

λf…filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999).

- **Profil povrchu**

Profil povrchu je profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny (Obr. 34). V praxi se obvykle volí rovina kolmá k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem ve vhodném směru (ČSN EN ISO 8785:1998, 2000).



Obr. 34 Profil povrchu (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999)

Profil povrchu se rozlišuje na tři druhy podle normy ČSN EN ISO 4287:1998 (1999):

Základní profil…je základem pro hodnocení parametrů základního profilu. Je to úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru λs (ČSN EN ISO 3274:1998, 1999).

Profil drsnosti…je úmyslně pozměněn a je základem pro hodnocení parametrů profilu drsnosti. Profil drsnosti je odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru λc.

Profil vlnitosti…je záměrně pozměněn a je základem pro hodnocení parametrů profilu vlnitosti. Profil vlnitosti je odvozený postupnou aplikací filtru profilu λf a filtru profilu λc na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λf a krátkovlnné složky filtrem profilu λc.

- **Základní (l_p, l_r, l_w) a vyhodnocovaná (l_n) délka**

Základní délka je délka ve směru osy X, použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil. Základní délka pro drsnost l_r a pro profil vlnitosti l_w jsou číselně rovné charakteristické vlnové délce profilového filtru λc, případně λf. Základní délka pro základní profil l_p se rovná vyhodnocované délce (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999).

Vyhodnocovaná délka je délka ve směru osy *x*, použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Může obsahovat jednu nebo více základních délek (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999).

- **Parametry**

Parametry slouží k 2D hodnocení struktury povrchu a mohou být vypočítány z kteréhokoliv profilu. Používají se normalizované parametry dle ČSN EN ISO 4287:1998 (1999) a první velké písmeno v symbolu parametru určuje typ vyhodnocovaného profilu:

P-parametr… ... parametr vypočítaný ze základního profilu,

R-parametr..... parametr vypočítaný z profilu drsnosti,

W-parametr..... parametr vypočítaný z profilu vlnitosti.

- **Výstupek a prohlubeň profilu, prvek profilu**

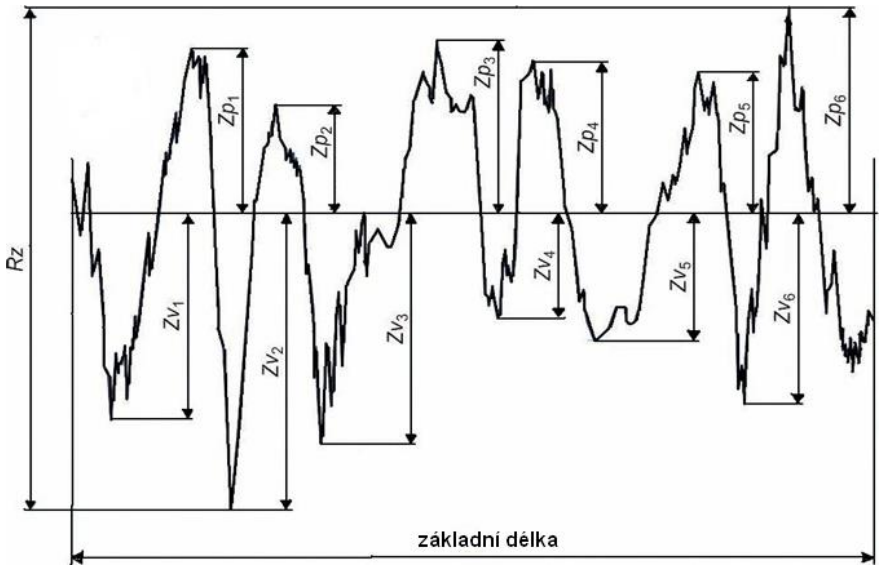
Výstupky jsou z povrchu ven směřující (z materiálu do okolního prostředí) části posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou *x*. Prohlubně jsou naopak dovnitř směřující (z okolního prostředí do materiálu) části posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou *x*. Prvek profilu je určen výstupkem profilu a jeho přilehlou prohlubní (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999).

- **Výškové parametry profilu povrchu**

Největší výška výstupku profilu (P_p, R_p, W_p) je výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky (Obr. 35).

Největší hloubka prohlubně profilu (P_v, R_v, W_v) je hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (Obr. 35).

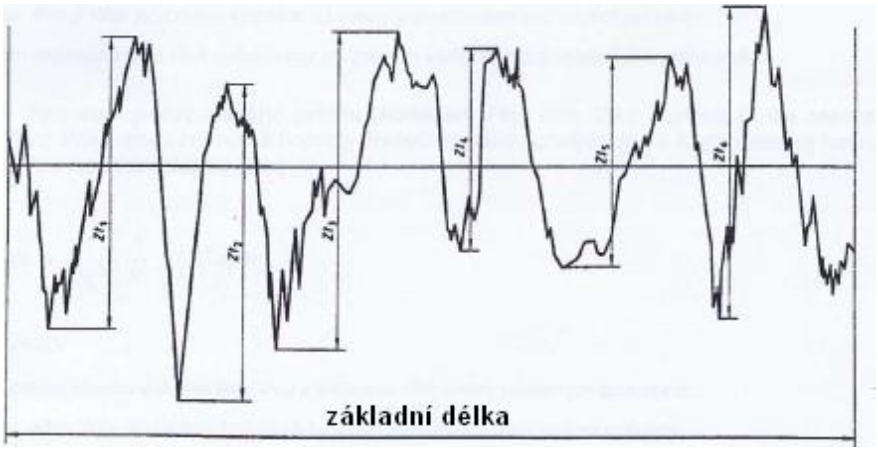
Největší výška profilu (P_z, R_z, W_z) je součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (Obr. 35).



Obr. 35 Výškové parametry profilu povrchu (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999)

Průměrná výška prvků profilů (P_c, R_c, W_c) je průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky a její hodnota je dána rovnicí (5). Výška profilu Z_t je definována jako součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu (Obr. 36).

$$R_c = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Z_{ti} \qquad [\mu m] \qquad (5)$$



Obr. 36 Průměrná výška prvků profilu (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999)

Celková výška profilu (P_t, R_t, W_t) je součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky l_n (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999).

6.2 Kvalitativní metody hodnocení kvality povrchu

6.2.1 Vizuální metody

Vizuální metoda je základní a nejjednodušší metoda hodnocení kvality povrchu a je vhodná pro rychlé posouzení a selekci obrobků v případě přítomných viditelných vad nebo např. pro srovnání zkoumaného povrchu s vhodně zvolenými vzory, nicméně z důvodu malé přesnosti málo využívaná. Pro přesně stanovení a vyjádření drsnosti pomocí čísel je potřeba vhodných měřicích přístrojů (Dostál, 1962).

Spočívá v subjektivním zhodnocení zkoumaného předmětu na světle lidským okem, popřípadě za pomocí lupy. Tato metoda je vhodná na rychlé posouzení obrobku, zda je potřeba následná kontrola mnohem přesnější metodou, protože např. drsnost povrchu je zřejmě lepší nebo horší než drsnost specifikovaná. Tato metoda je také vhodná pro zhodnocení viditelných vad, které mohou zásadně ovlivnit funkci hodnoceného povrchu. V případě, že vizuální metoda nepomůže k přijetí určitého rozhodnutí, lze provést porovnání za pomocí srovnávacích vzorků nebo hmatem (ČSN EN ISO 4288:1998, 1999).

Jak již bylo řečeno, vizuální metoda funguje na principu posouzení zkoumaného povrchu lidským zrakem, které vnímá prostor za pomoci očí – senzorů. Definování objektů v prostoru je založeno na stereoskopii (prostorovém vidění) a velkou roli zde hrají zkušenosti a učení samotného vnímání prostoru (Mandát, 2012).

6.2.2 Srovnávací metody

Srovnávací metoda, jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole, je metoda opět založená na subjektivním posouzení a zkušenostech hodnotícího pracovníka. Funguje na principu referenčních vzorků (vzorových standardů), se kterými porovnáváme zkoumané vzorky. Stejně jako vizuální metoda je vysoce závislá na lidském faktoru, a proto slouží pouze jako orientační ukazatel, který ovšem stačí pro běžný dílenský provoz pro jednoduché kvalitativní zhodnocení povrchu (Dostál, 1962).

Srovnávání je prováděno pracovníkem prostřednictvím jeho zraku a hmatu – zkoumaný povrch hodnotí pohledem, popřípadě po něm přejíždí prstem nebo nehtem anebo tužkou či kouskem kovu. Mezi nástroje využívané pro tuto jednoduchou metodu

patří lupy s 10násobným až 40násobným zvětšením, binokulární lupy nebo jednoduché mikroskopy s 25 až 200krát zvětšením prostorového obrazu povrchu (Dostál, 1962).

Obecně lze nejspolehlivějších výsledků kontroly kvality povrchu dosáhnout s měřicími přístroji, a proto by měla být prováděna kontrola za jejich pomoci už od samého počátku.

6.3 Kvantitativní metody hodnocení kvality povrchu

Kvantitativní metody na rozdíl od kvalitativních metod jednoznačně určují stupeň drsnosti pro daný případ, např. pro přesné předepsání drsnosti na konstrukční výkres. Jelikož jsou tato měření časově náročnější, nelze zkoumat každý obrobek, ale pouze vybrané vzorky. Měřena jsou různá místa na určitém hodnoceném povrchu, z nichž se pak vypočítají střední hodnoty, protože drsnost povrchu i na stejné ploše značně kolísá. Z hlediska náročnosti je rozhodně snazší kontrolovat plochy rovinné, zatímco plochy válcové nebo tvarové vyžadují snímače doplněné o zvláštní zařízení (Dostál, 1962).

Tab. 10 Srovnání kontaktních a bezkontaktních metod (Metelková, 2014)

Kritérium	Kontaktní metoda	Bezkontaktní metody	Komentář
Typ dat	2D/3D	2D/3D	Optická zařízení mohou měřit 3D povrchy v rámci jednoho měření, pro dotyková zařízení je proces 3D mapování pomalejší.
Poškození povrchu během snímání	Možné poškození	Bez poškození	Snímací hrot může poškodit nebo poškrábat měřený povrch, zvláště v případě měkkých materiálů.
Množství dat	Menší	Větší	Velké množství dat naměřených optickým přístrojem.
Měření ve výrobním prostředí	Ne	Ano	Optická zařízení mohou pracovat i v prostředí blízkém výrobě.
Ovládání	Jednoduché	Složité	Optická zařízení si žádají složitější nastavení.
Algoritmy	Jednoduché	Složité	Dotykové systémy používají znatelně jednodušší algoritmy než optické.
Rychlost měření	Nízká	Vysoká	Optická zařízení mívají vyšší rychlost měření.
Rychlost analýzy dat	Vysoká	Nízká	Větší množství dat, ale i větší možnosti analýzy způsobují pomalejší analýzu naměřených dat.
Komplexnost tvarů	Nízká	Vysoká	Optickými 3D přístroji lze změřit větší množství součástí.
Nákladnost	Levnější	Dražší	Investice do 3D optických zařízení je znatelně vyšší než do dotykových profiloměrů.

6.3.1 Optické metody

Optická metoda hodnocení kvality povrchu je způsob bezdotykového měření, kdy nedochází k narušení měření povrchu. Dle Mandáta (2012) lze optické metody rozdělit na bodová (2D) a plošná (3D). Jeho další dělení se zaměřuje na metody, které k měření využívají obecně vlnění, a která lze tedy rozdělit podle charakteru tohoto vlnění a vlnové délky použitého záření na:

- rentgenovská měření,
- magnetickou resonanci,
- metody využívající elektromagnetického záření ve viditelném spektru,
- radiové vlny,
- mechanické vlnění prostředí (např. ultrazvuk).

Z uvedeného rozdělení jsou pro bezkontaktní topografická měření nejčastěji využívané metody, které fungují na principu detekce elektromagnetického záření v oblasti viditelného spektra (cca λ = 400–750 nm). Rentgenovská měření, magnetická resonance a ultrazvuk jsou v praxi nejvyužívanější v oblasti medicíny, radiové vlny zase nachází největší uplatnění v radiolokátorech, tedy v letectví, metrologii apod. (Mandát, 2012).

Jak již bylo řečeno, optická metoda využívá místo dotykového hrotu světelný svazek, který se na hodnoceném povrchu rozptyluje nebo odráží. Vzájemné působení povrchu a světelného paprsku je závislé na drsnosti měřeného povrchu, vlnové délce světla a také na materiálových vlastnostech hodnoceného vzorku. Většina těchto metod se hodí na měření velmi malých (menší než 1 μm) nerovností povrchu. Na rozdíl od mechanických způsobů hodnocení kvality povrchu je tato metoda nepřímá a měřená data je nutné srovnávat s daty získanými kontaktním profilometrem s velkou opatrností, protože někdy mohou být měřicí spektrální rozsahy metod při porovnávání rozdílné. Současně s sebou tato metoda přináší komplikovanější způsob interpretace výsledků a také ztíženou korelaci na normované parametry (Valíček a Hloch, 2008).

Naopak má tato metoda výhodu v opakovatelném a bezkontaktním (tudíž i nedestruktivním) měření, kdy lze také měřit z větší vzdálenosti. Kontrola může

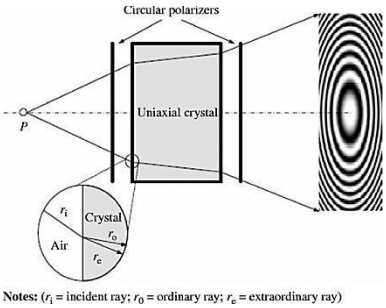
být prováděna kontinuálně, stejně jako řízení kvality povrchu. Ačkoliv je pro klasický způsob hodnocení struktury povrchu upřednostňováno použití dotykových přístrojů, optické metody často převažují tuto standardní správnost výsledku díky svým praktickým výhodám. To se děje především u kontrolních procesů, kdy je upřednostňována rychlost měřicího procesu a relativní měření je důležitější než absolutní. Současně existuje řada povrchů, které lze měřit pouze pomocí optických metod kvůli velkým rozměrovým rozdílům profilu hodnoceného povrchu, kvůli čemuž je nemožné použít snímací hrot dotykového přístroje (MM Průmyslové spektrum, 2005; Valíček a Hloch, 2008).

6.3.1.1 Bodová měření

Bodová měření jsou založena na principu postupného skenování v definovaných bodech. Čas potřebný k naměření celého nebo části povrchu lze definovat pomocí jednoduchého vztahu $n \cdot (t + t_t)$, kde n vyjadřuje počet bodů, které je potřeba naměřit, t je doba potřebná pro jedno měření a t_t je čas potřebný pro změnu pozice, aby mohl být měřen další bod (Mandát, 2012). Vzhledem k zaměření této práce nebudou tyto jednotlivé metody rozebrány, jelikož jsou primárně využívány pouze na měření vzdálenosti objektu od měřicího systému.

- **Konoskopická metoda**

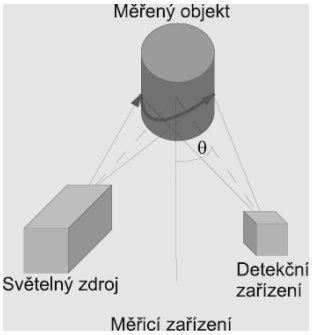
Konoskopická metoda patří primárně mezi bodová měření, kdy měří vzdálenost nebo topografickou výchylku pouze jednoho bodu měřeného povrchu, ale může být využita na měření celkové topografie povrchu. Funguje na principu interference dvou vln na CCD snímač (Charge-Coupled Device), které mají za zdroj světelný bod na povrchu zkoumaného předmětu. Ačkoliv je jednoduchá na přístrojové vybavení (sestava je složená z dvojlomného krystalu, zkřížených polarizátorů, optiky a detekčního zařízení), vyhodnocování této metody je složitější (Obr. 37) (Mandát 2012).



Obr. 37 Princip konoskopie (Mandát, 2012)

6.3.1.2 Profilová měření

Princip profilovacích metod je založen na tom, že se neměří bod po bodu, ale v jednom okamžiku je změřena sada *n* bodů v jednom profilu (řezu) hodnoceného předmětu (Obr. 38). Měření vychází z předpokladu, že povrch daného předmětu leží v rovině *x*, *y* a topografická výchylka, kterou hledáme, je shodná s osou *z*. Počet měřených *n* bodů se odvíjí od rozlišení detekčního zařízení a je rovnoběžný např. s osou *x*. Výsledkem je matice bodů 3 × *m* × *n* s hodnotami *x*, *y* a *z*, která slouží k zrekonstruování hodnoceného povrchu v diskrétních bodech. Typickou metodou fungující na principu profilovacího měření je 3D skenovací profilometrie (Mandát, 2012).



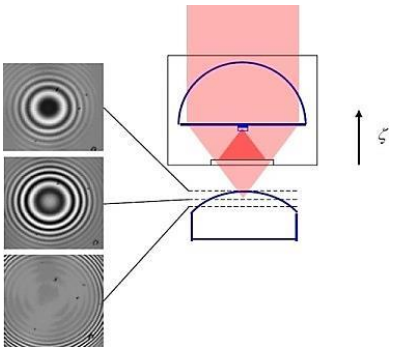
Obr. 38 Princip profilovacího měření (Mandát, 2012)

6.3.1.3 Plošná měření

Tento druh bezkontaktního měření využívá optické záření, které je koherentní nebo nekoherentní. Mimo následujících metod existuje i řada alternativních (většinou modifikovaných) metod, které jsou využívány na konkrétní aplikaci (Mandát, 2012).

- **Koherenční skenovací interferometrická metoda**

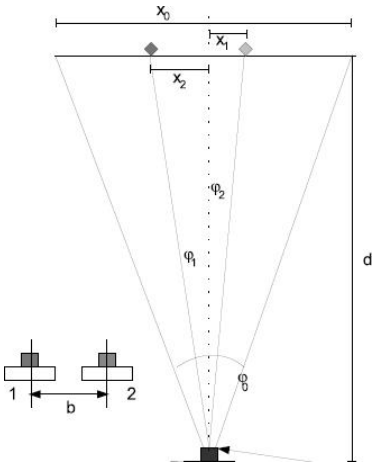
Koherenční skenovací interferometrie využívá k měření bílé světlo a interferenční proužky, které jsou stěžejní pro určení výškových souřadnic jednotlivých bodů povrchu. Prvním krokem měření je zaostření hodnoceného povrchu, a následně je povrch srovnán kolmo k optické ose a v pravidelných intervalech dochází k zaznamenávání průběhů interferečních signálů, neboli interferogramů, pro každý jednotlivý pixel kamery. Přístroj je tvořen dvoupaprskovým interferenčním objektivem, který obsahuje vnitřní zrcátko a má možnost velkého zvětšení (Metelková, 2014).



Obr. 39 Příklad interferogramů pro různé výškové hladiny měření (Vorburger, 2012)

- **Stereoskopická metoda**

Tato metoda se používá k 3D projekci obrázků a snímků, kdy se vytváří iluze prostoru na 2D snímku díky rozposunutí dvou shodných snímků v jedné ose (Obr. 40). Pozorovaný předmět nebo scéna se zaznamenají pomocí dvou stejných záznamových zařízení, popřípadě se se jedno záznamové zařízení posune o určený úsek. Na stejném principu v dnešní době fungují televizory a kina, a hojně se také využívá pro mapování topografie zemského povrchu, kdy se jedno záznamové zařízení pohybuje nad zaznamenávaným terénem pomocí letadla nebo družice. V neposlední řadě je tato metoda používaná pro topografické měření drobných předmětů, které mohou mít velikost v rozmezí centimetrů až desítek centimetrů (Mandát 2012).



Obr. 40 Princip stereoskopické metody (Mandát, 2012)

- **Metoda měření tvaru pomocí stínů**

Tato metoda je jednoduchá na přístrojové zařízení (pouze světelný zdroj záznamové zařízení) a funguje na principu, kdy se tvar povrchu hodnoceného objektu rekonstruuje pomocí analýzy intenzitního průběhu snímaného předmětu. Nevýhodou

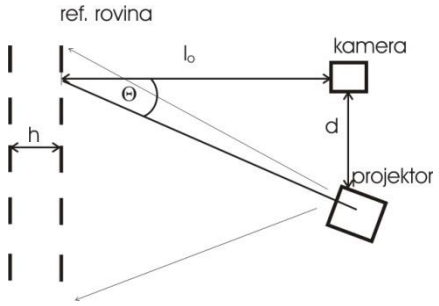
ovšem je, že lze aplikovat pouze na Lambertovské povrchy, tedy povrchy ideálně matné (ideálně difuzní), které odráží světlo do všech směrů stejně. U těchto povrchů známe směr osvitu a normálu k osvětlovanému povrchu, díky čemuž lze spočítat intenzitu odraženého světla pomocí rovnice. Normála povrchu v daném bodě je poté vyhodnocena analýzou intenzity tohoto bodu (Mandát, 2012).

- **Metoda měření tvaru pomocí textur**

Při této metodě se analyzuje deformace obecné struktury nanesené na povrch hodnoceného objektu, kdy rovinnému povrchu s periodickou texturou se obraz struktury mění jenom vlivem zobrazení (odchylka, zvětšení). V případě, že je povrch objektu s texturou deformován, dojde k deformaci této struktury a vyhodnocený obraz je vůči původnímu stavu pozměněn (Mandát, 2012).

- **Fourierovská profilometrie**

Fourierovská profilometrie funguje na principu snímání periodické struktury promítané na povrch hodnoceného předmětu a současným srovnáním s tvarem totožné struktury na referenčním objektu. Rozdíl fází těchto struktur v měřených bodech charakterizuje jejich výškové rozložení. Pro tuto metodu jsou ideální povrchy difuzně odrazné a současně je důležitá volba projektoru, periodické struktury a periody mřížky. Při měření je kamera spolu s projektorem stejně vzdálená od referenční roviny, jejíž struktura je nasnímána předtím, než je do zorného pole kamery vložen zkoumaný povrch (Obr. 41) (Mandát 2012).



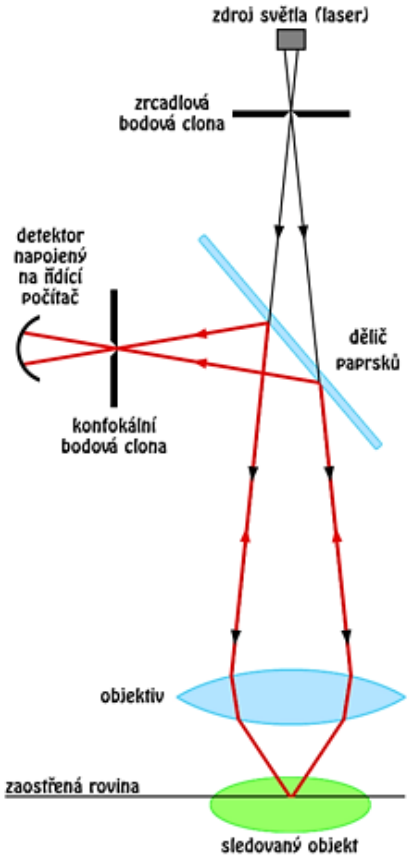
Obr. 41 Geometrie Fourierovské profilometrie (Mandát, 2012)

Ačkoliv je tato metoda složitější na algoritmus výpočtu, její měření je rychlejší a není náročná na experimentální vybavení oproti Moiré nebo 3D skenovací topografii. Současně v porovnání se zmíněnými metodami je potřeba pouze jeden snímek, zatímco

3D skenovací profilometrie jich potřebuje řádově desítky a Moiré topografie vystačí běžně se snímky dvěma (Mandát 2012).

- **Konfokální mikroskop**

Konfokální mikroskop oproti ostatním metodám světelné mikroskopie vyniká svým vysokým rozlišením a kontrastem díky tomu, že světlo detekuje pouze v ohniskové rovině mikroskopu. Může být dvojího typu – laserový rastrující (LSCM) nebo s rotujícím diskem (TSCM) a existuje také fluorescenční konfokální mikroskop, kterým místo odraženého světla prochází emitované fluorescenční záření. Zdrojem světla u konfokálního mikroskopu je laser (ultrafialové, infračervené nebo viditelné spektrum), který přes konfokální clonu a objektiv osvětluje zkoumaný objekt. Objektivem také prochází odražené nebo rozptýlené světlo. Paprsky následně projdou dichronickým zrcadlem až k bodové cloně, kde se odfiltruje světlo z jiných rovin, a vstoupí do fotonásobiče, kde jsou zesíleny a detekovány. Jeden snímek obsahuje informaci pouze o jednom bodu, proto je potřeba vytvořit sérii snímku, abychom dostali obraz celé roviny (Plášek, 1995; WikiSkripta, 2016).



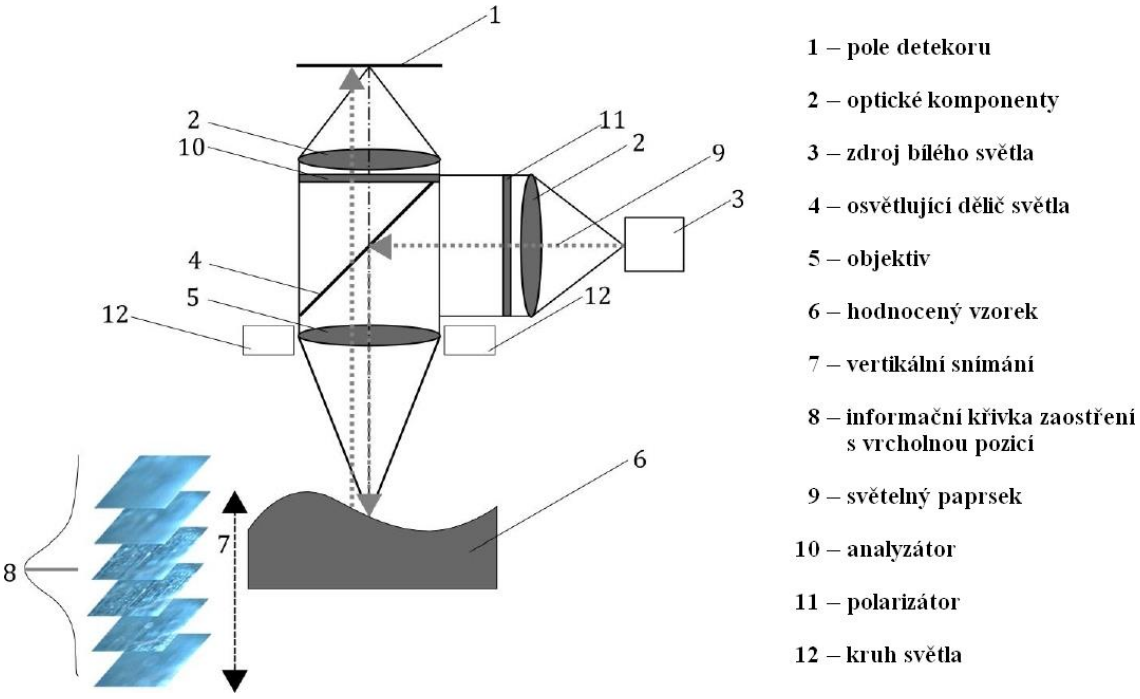
Obr. 42 Princip konfokálního mikroskopu

Tato metoda vyniká mimořádné ostrým, kontrastním a informativním obrazem ve vysokém rozlišení a obraz lze nasnímat ve skutečných barvách. Výhodou je také získání 3D obrazu s velkou hloubkou ostrosti a omezení blednutí, díky omezené době expozice excitačním zařízením (Ústav fyziky FAST VUT, 2009; Sehadová, 2011).

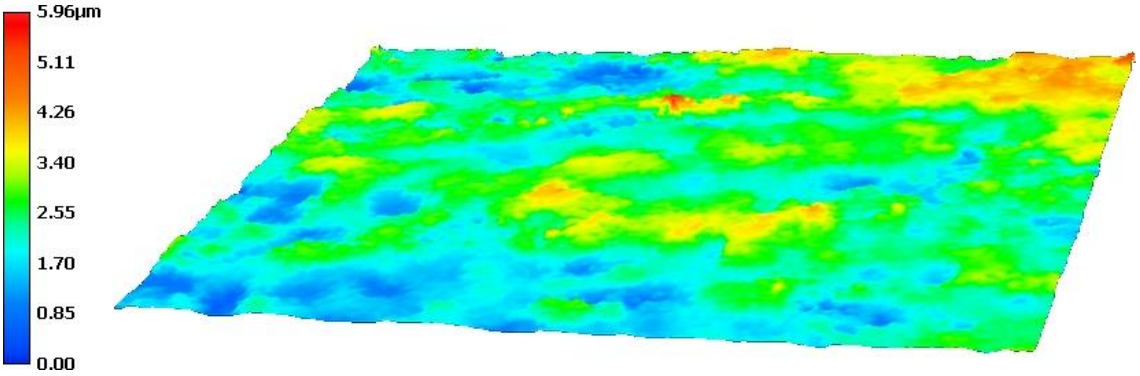
- **Metoda měření tvaru předmětu pomocí ostření/rozostření obrazu**

Tato metoda (jinak také Focus Variation – variace ostření) funguje na podobném principu jako konfokální mikroskop, liší se jen v citlivosti a rozsahu metody – metoda ostření/rozostření obrazu má rozlišení v mikrometrech, zatímco konfokální mikroskop v řádech nanometrů. Základním principem této metody je využívání ostrosti obrazu povrchu (nebo jiné vlastnosti odraženého světla při optimálním zaostření), ke zjištění výšky povrchu v každé pozici měřeného povrchu (Obr. 43). Metoda primárně využívá bílé koaxiální regulovatelné osvětlení s vhodným rozsahem vlnových délek, a odražené světelné paprsky se zaznamenávají senzorem v optické části mikroskopu. Základ přístroje tvoří optický mikroskop obsahující různé čočky, které mohou být vybaveny odlišnými objektivy, díky kterým lze provádět měření s rozdílným rozlišením. Samotné měření probíhá za pohybu detekčního zařízení nebo zkoumaného objektu ve směru normály k hodnocenému povrchu. Pro tuto metodu je charakteristické, že stupňovité vrcholy lze měřit bez „uhlazovacího efektu“, pokud se nejvyšší oblasti odpovídající rozdílným vrcholům nepřekrývají (Mandát, 2012; Metelková, 2014; ČSN EN ISO 25178-606:2015, 2016).

Soustava souřadnic přístroje se skládá ze tří os (x, y, z), kde osy x a y jsou rovina určená referenční plochou nástroje, a osa z je rovnoběžná s osou optickou a zároveň kolmá k rovině (x, y) přístroje. Metoda využívá algoritmy, které spojují změnu vypočítané ostrosti jednotlivých bodů a rozdílné odrazy osvětlení, kdy díky změny míry ostrosti přiřazuje bodu třetí souřadnici – výškovou. Algoritmy současně slouží k převodu získaných dat do 3D informace a obrazu ve skutečných barvách s plnou hloubkou pole. Kromě snímaných výškových dat tato metoda také poskytuje informace o barvě pro každý naměřený prostorový bod, což ve výsledku vytváří barevný obraz usnadňující měření a identifikaci charakteristických místních povrchových útvarů (Obr. 44). To je podstatný aspekt smysluplného prostorového měření, jelikož mezi opticky barevným obrazem povrchu a jeho hloubkovou informací jsou často vizuální vzájemné souvislosti (Mandát, 2012; ČSN EN ISO 25178-606:2015, 2016).



Obr. 43 Schéma Focus variation mikroskopu (ČSN EN ISO 25178-606:2015, 2016)



Obr. 44 Barevné zobrazení hodnoceného povrchu

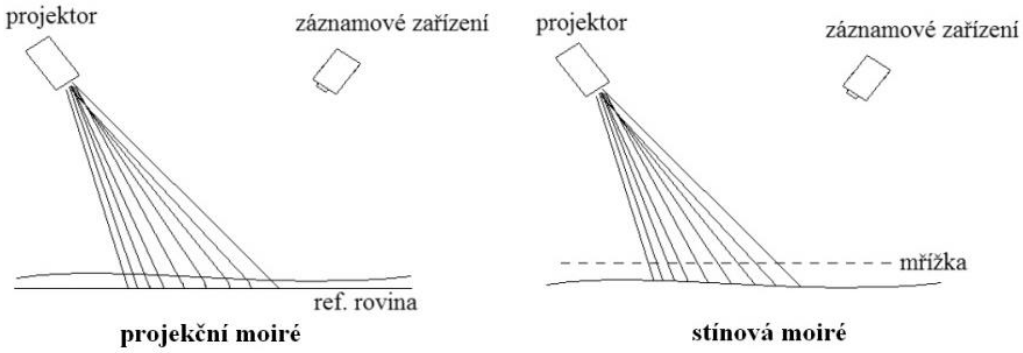
Při hodnocení povrchu touto metodou se využívá polarizace – metoda, která umožňuje odfiltrovat světelné paprsky v některých polarizačních stavech. To je možné díky speciálním optickým filtrům (polarizátory a analyzátory), které umožňují odstranění složek zrcadlícího se světla. Polarizátory slouží k polarizaci paprsků světelného zdroje ještě před jejich propuštěním k hodnocenému povrchu, zatímco analyzátory polarizují světelné paprsky až poté, co se od hodnoceného povrchu odrazí (ČSN EN ISO 25178-606:2015, 2016).

Mezi přednosti této metody patří její vysoká hloubka ostrosti a výborné rozlišení zobrazovaných objektů. Měření jsou flexibilní a vysoce přesná, přičemž záznam lze snadno uložit a po čase opětovně vyvolat se všemi náležitostmi (např. celkový

3D profil). Současně jsou měření opakovatelná při postupných měřeních stejného povrchu při stejném nastavení přístroje. Spojování obrazu pracuje v reálném čase a metodu Focus Variation lze využít např. pro hodnocení textury povrchu nebo profilu tvaru, drsnosti a vlnitosti (Ústav hospodářské úpravy lesa a aplikované geoinformatiky, 2013; ČSN EN ISO 25178-606:2015, 2016).

- **Moiré metody**

Moiré metody využívají projektování dvou pravidelných struktur na povrch hodnoceného předmětu, kdy jejich splynutím vzniká struktura třetí, kterou lze pozorovat na měřeném objektu. Pravidelnými sktrukturami bývají matice bodů, lineární nebo radiální mřížky apod. Citlivost této metody lze ovlivnit hustotou mřížky, popřípadě pomocí „phase shifting“ metody, která slouží k posunutí fáze projektované mřížky. Dva nejběžnější typy Moiré metod jsou „projekční moiré“ a „stínová moiré“ (Obr. 45). První typ funguje na principu, kdy se prvně nasnímá referenční mřížka, a poté mřížka projektovaná. Po obou snímáních se vypočítá frekvence a fáze mřížky v obraze a paměť počítače sečte výsledek. Tento druh Moiré metody má i obdobu v „dvouprojektorové moiré“, kdy se struktury projektují ze dvou směrů nebo projektorů. Druhá metoda se nazývá „stínová moiré“ a mřížka je zde umístěna před zkoumaný objekt. Mřížkou prochází světlo projektované na povrch objektu, který je současně snímán pomocí záznamového zařízení přes stejnou mřížku (Mandát, 2012).



Obr. 45 Moiré metody (Mandát, 2012)

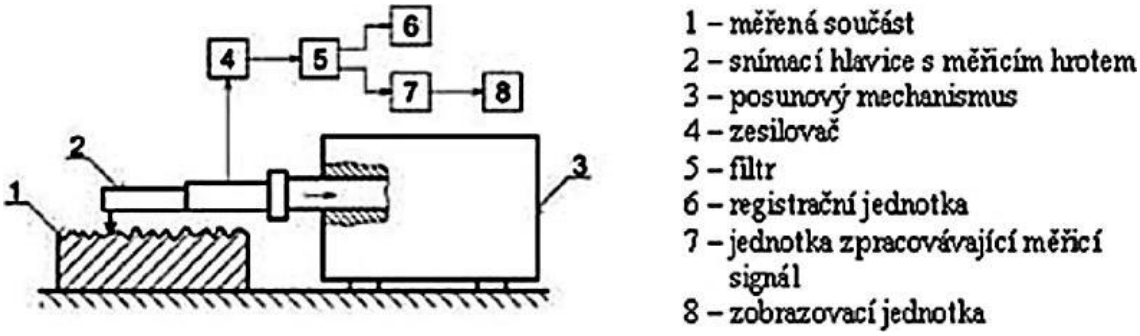
6.3.2 Dotykové metody

Mechanické neboli dotykové metody patří v současnosti především ve strojírenské praxi k nejrozšířenější metodám hodnocení povrchu, ačkoliv jsou čím dál častěji nahrazovány nebo doplňovány bezkontaktními metodami snímání profilu

povrchu. Výsledkem měření je analogový záznam povrchu, který jde následně převést do digitální formy. Tyto metody s sebou přináší mnoho výhod, jako je přímé měření výškových nerovností povrchu vůči referenční rovině a přesná reprodukovatelnost, díky které je možné opakovaně a identicky změřit geometrický profil povrchu. Metoda má vysokou rozlišovací schopnost a velký měřicí rozsah ve směru kolmém na střední rovinu povrchu a měřit je možné i v nečistém prostředí, kdy snímací hrot dokáže odsunout malé nečistoty (MM Průmyslové spektrum, 2005; Valíček a Hloch, 2008).

Nevýhodou je tlakové působení hrotu snímače na měřený povrch, kvůli čemuž dochází k plastické a elastické deformaci v povrchově vrstvě. Velikost této deformace je závislá na tvrdosti měřeného povrchu a ve většině případů dochází k poškození povrchu hrotem snímačem, což negativně ovlivňuje výsledek měření i samotný hodnocený povrch. Na druhé straně zde může paradoxně hrát roli i malá přítlačná síla snímacího hrotu, kdy měření může ztratit svou věrohodnost. Nevýhodou je také relativně pomalý pohyb hrotu po hodnoceném povrchu, což značně zvyšuje čas samotného měření. Z časové náročnosti je také tato metoda využívána primárně pouze na 2D měření. Mimo jiné nelze tuto metodu řídit na dálku a nelze provádět kontinuální kontrolu a řízení kvality povrchu (Bumbálek a Bumbálek, 2005; Valíček a Hloch, 2008).

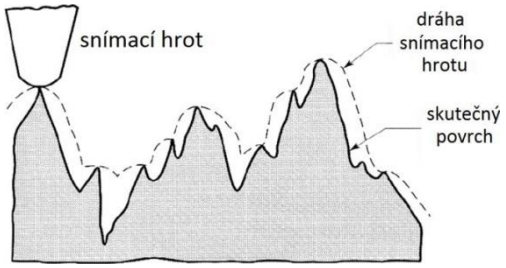
Princip mechanické metody (Obr. 46) spočívá ve spojitém vnímání přímého kontaktu s hodnoceným povrchem měřeného objektu. Textura povrchu je ideálně měřena pomocí bodového kontaktu diamantového hrotu, jehož geometrie je definována normou, s hodnoceným povrchem. Měřicí systémy mohou být 2D nebo 3D a oba typy lze použít jak pro změření jednotlivých bodů, tak i pro měření tvarů křivek či odchylek tvaru křivek (Metelková, 2014).



Obr. 46 Princip dotykového profilometru (Valíček a Hloch, 2008)

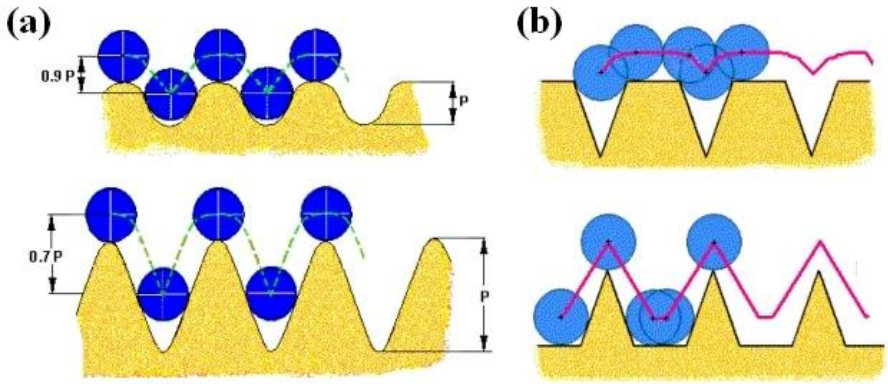
6.3.2.1 Profilová měření

Při profilovém (2D) měření není výsledkem přímo reálný profil hodnoceného povrchu, což je dáno poloměrem zaoblení snímacího hrotu (Obr. 47). Existují ale určité korekce, které vliv této chyby eliminují. Je proto nutné, aby poloměr zaoblení hrotu byl dostatečně malý, aby výsledná textura byla věrohodná – při výraznější struktuře má totiž hrot tendenci neměřit úzké prohlubně, kvůli čemuž jsou tyto prvky s velmi krátkou vlnovou délkou (popřípadě prvky s nevhodnou výškou a rozestupy) mechanicky vyčleněny (Metelková, 2014).



Obr. 47 Nákres snímaného profilu (Metelková, 2014)

Na Obr. 48 (a) je možné pozorovat dva profily se stejnými rozestupy nerovností, ale s odlišnými výškovými parametry, což má za následek zkreslení měřených hodnot. S tím souvisí i měření prohlubní užších, než je samotný poloměr zaoblení snímacího hrotu, viz Obr. 48 (b). Z toho vyplývá, že čím je struktura povrchu jemnější, tím je měření efektivnější, stejně jako vhodnější jsou povrchy s odpovídajícími parametry šikmosti a symetrie (Metelková, 2014).



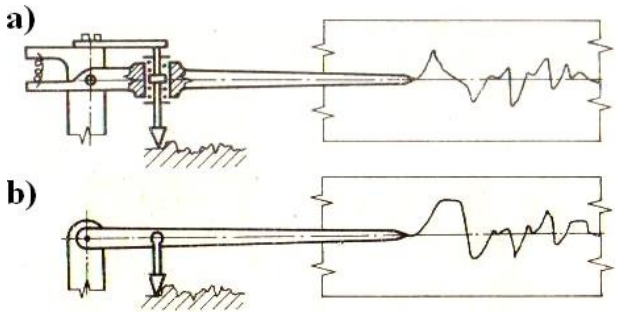
Obr. 48 Vliv mechanického filtrování na měřenou drsnost (a) a vliv parametru šikmosti na dráhu snímacího hrotu (b) (Taylor Hobson, 2002)

Mezi nejrozšířenější a nejuniverzálnější dotykové profiloměry patří ty s mechanicko-elektrickým převodem, které jsou velmi přesné a citlivé, lze s nimi

vyhodnocovat různé normalizované charakteristiky drsnosti povrchu. Současně s nimi lze většinou získat i grafický záznam profilu. Změny polohy měřicího hrotu jsou převáděny snímačem na analogové změny elektrického napětí nebo indukčnosti a dle konstrukce snímače je lze rozdělit na dva druhy – generátorového a impedančního typu (Bumbálek et al., 1989).

Rozdíly mezi výše uvedenými dvěma typy lze modelově vysvětlit na pákových systémech. Snímače generátorového typu (Obr. 49, a) fungují na principu, kdy páka sleduje pouze rychlé pohyby měřicího hrotu a obě pružiny znázorněného tlumiče fungují jako tuhá spojka. To ovšem způsobuje zkreslení záznamu profilu, jelikož při pomalých změnách hrotu (např. u vlnitého povrchu nebo u ploch s většími výstupky či prohlubněmi) by naopak pružiny tlumiče měly včas vyrovnávat změny tlaku a stále tlačit rameno páky do střední polohy. Mezi tento druh snímačů patří elektromagnetické, elektrodynamické a piezoelektrické snímače (Bumbálek et al., 1989).

Naopak funkce snímače impedančního typu (Obr. 49, b) se dá přirovnat k tuhé páce, kdy tvar měřeného profilu je úměrný změnám polohy měřicího hrotu. Mezi tento druh snímačů patří induktivní a kapacitní snímače (Bumbálek et al., 1989).



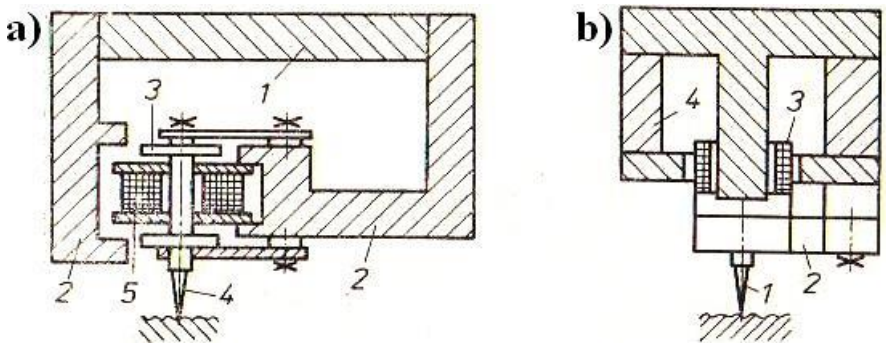
Obr. 49 Pákový model funkce snímačů drsnosti povrchu generátorového (a) a impedančního (b) typu (Bumbálek et al., 1989)

- **Elektromagnetické a elektrodynamické snímače**

Tyto dva druhy snímačů byly používány u starších typů profilometrů. Princip elektromagnetického snímače (Obr. 50, a), a je založen na magnetickém obvodu tvořeným permanentním magnetem (1) a pólovými nástavci (2), mezi kterými kmitá železná kotva (3) vychylovaná měřicím hrotem (4). V pevné cívce (5) dochází ke změně magnetického toku následkem pohybu kotvy, čímž se v závitech cívky indukuje elektrické napětí, které je úměrné změně rychlosti pohybu měřicího hrotu. Tento druh

vyniká svou malou hmotností pohyblivé části snímače a odolností proti mechanickému poškození (Bumbálek et al., 1989).

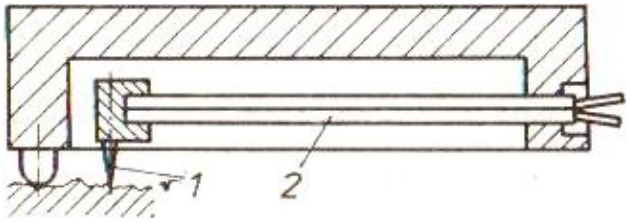
Elektrodynamický snímač (Obr. 50, b), má měřicí hrot (1) pevně spojen s cívkou (3), která může volně kmitat ve vzduchové mezeře silného permanentního magnetu (4) s pólovými nástavci. Výstupní elektrické napětí snímače závisí na změně rychlosti pohybu hrotu, což je způsobeno tím, že při pohybu cívky v magnetickém poli vzniká v závitech elektromotorická síla úměrná rychlosti změny indukčního toku (Bumbálek et al., 1989).



Obr. 50 Elektromagnetický (a) a elektrodynamický (b) snímač (Bumbálek et al., 1989)

- **Piezoelektrické snímače**

Piezoelektrické snímače, viz Obr. 51, jsou tvořeny destičkami s obrácenými elektrickými náboji na opačných stranách při namáhání ohybem nebo tlakem, které jsou buď vyříznuté z krystalů některých látek (např. křemene, turmalínu, bariumtitanátu, Segnetovy soli apod.) nebo vyrobené ze speciálních keramických materiálů. Destička z piezoelektrického materiálu (2) je deformována měřicím hrotem (1) přímo, nebo přes pákový převod, a elektrické napětí, které je úměrné namáhání destiček, je snímáno na jejich polepech z vodivého materiálu. Předností těchto snímačů je jejich malá velikost, díky čemuž jsou vhodné pro měření drsnosti v dírách malého průměru, dutinách apod. (Bumbálek et al., 1989).

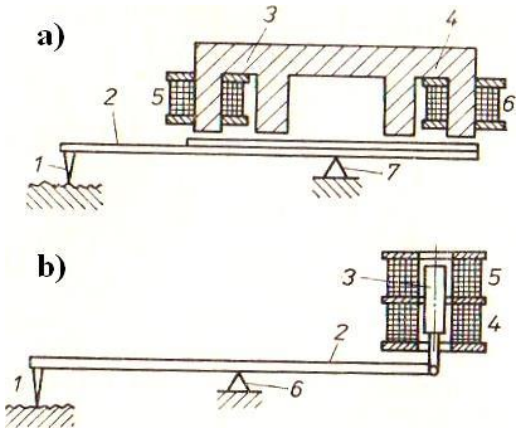


Obr. 51 Schéma piezoelektrického snímače (Bumbálek et al., 1989)

- **Elektroinduktivní snímače**

Elektroinduktivní snímač zajišťuje jedno z nejpřesnějších měření, kdy díky změně polohy měřicího hrotu dochází ke změně impedance elektrického obvodu, a to nejčastěji indukčnosti. K měření drsnosti se nejčastěji využívají dva typy, kdy u prvního (Obr. 52, a) měřicí hrot (1) mění sklon dvouramenné páky (2) a tím současně i velikost vzduchové mezery mezi magnetickými obvody (3 a 4) a indukčnostmi (5 a 6). Při volbě otočného bodu páky (7) je potřeba dbát na to, aby při změně jejího sklonu docházelo ke shodnému zvětšování a zmenšování vzduchových mezer obou indukčností (Bumbálek et al., 1989).

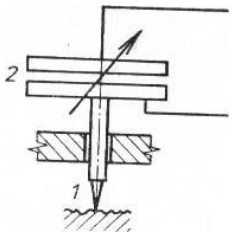
Druhé konstrukční provedení elektroinduktivního snímače obsahuje pohyblivé feromagnetické jádro (Obr. 52, b), kdy se změna polohy měřicího hrotu nepromítá do velikosti vzduchové mezery magnetického obvodu, ale ke změnám indukčnosti dochází přesouváním feromagnetického jádra (3) uvnitř jedné nebo dvou nad sebou uspořádaných cívek (4 a 5) (Bumbálek et al., 1989).



Obr. 52 Schéma elektroinduktivního snímače (a) a elektroinduktivního snímače s pohyblivým feromagnetickým jádrem (b) (Bumbálek et al., 1989)

- **Kapacitní snímače**

Kapacitní snímač, viz Obr. 53, je tvořen dvěma dokonale izolovanými destičkami z elektricky vodivého materiálu, které tvoří měřicí kondenzátor (2). Pohyb měřicího hrotu (1) způsobuje změnu vzdálenosti destiček, čímž současně dochází ke změně kapacity měřicího kondenzátoru (Bumbálek et al., 1989).



Obr. 53 Schéma elektrokapacitního snímače (Bumbálek et al., 1989)

6.3.2.2 Plošná profilová měření

V současnosti je díky vyspělé počítačové technice možné za pomoci speciálního softwaru provádět také plošná (3D) měření, která u dotykových přístrojů nejsou složena z kontinuálních dat, ale ze sítě bodů, která je vytvořena jednotlivými nasnímanými profily. Taková měření je možné uskutečnit pomocí složitější a výkonnější techniky, protože je potřeba velké množství naměřených dat (bodů), aby bylo dosáhnuto dostatečné přesnosti. Princip plošného měření vychází z metody profilové, která s pravidelnými odstupy měří rovinné profily a která je současně o něco rychlejší než samotné plošné měření. Následně jsou data získaná z měření jednotlivých profilů spojena a vytvoří 3D plochu. U dotykové metody zajišťující plošné měření je rozlišení velmi dobré u vertikálního rozlišení, naopak u horizontálního rozlišení je o něco horší, a to především ve směru napříč profily (Metelková, 2014).

6.3.3 Jiné metody

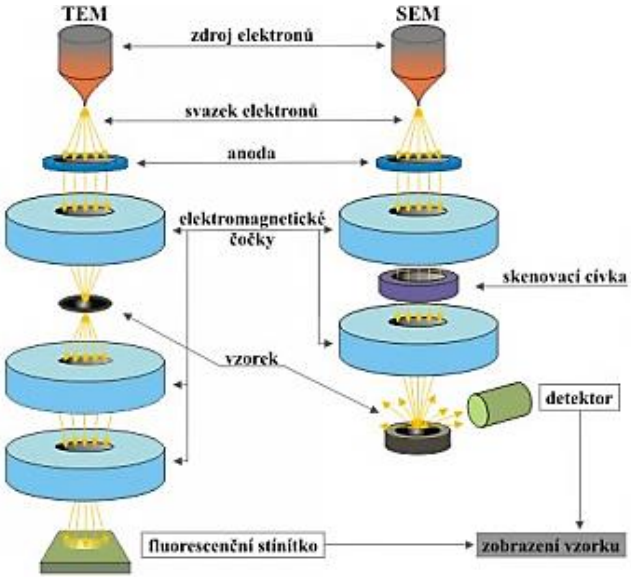
Mimo uvedené kontaktní a bezkontaktní metody hodnocení topografie povrchu existuje řada dalších metod, které fungují na odlišných principech. Zde je uveden stručný výčet příkladů takovýchto alternativním metod:

- **Elektronový mikroskop**

Elektronové mikroskopy mají vyšší rozlišení než optická a dotyková měřicí zařízení. Místo fotonů využívají elektrony a místo optické čočky jsou zde čočky elektromagnetické. Principiálně vychází z úvahy, že elektron považujeme za hmotnou částici, a měří a popisují tvar za pomoci svazku elektronů odrazených od hodnoceného obrobku. Výhodou je snadná interpretace obrazu spolu s přípravou vzorků (Mandát, 2012; Metelková, 2014).

Elektronové mikroskopy můžeme rozdělit na dva druhy (Obr. 54), a to transmisní (TEM) a rastrovací (SEM), kdy rastrovací elektronový mikroskop se také někdy nazývá

řádkovací nebo skenovací. Rozdíl mezi těmito dva druhy je takový, že transmisní elektronová mikroskopie funguje na principu průchodu svazku elektronů tenkým vzorkem, zatímco rastrovací analyzují hodnocené povrchy bez jejich prozáření tímto paprskem. Současně je SEM schopný podat informaci o prvkovém složení vzorku (Mandát, 2012; Metelková, 2014).

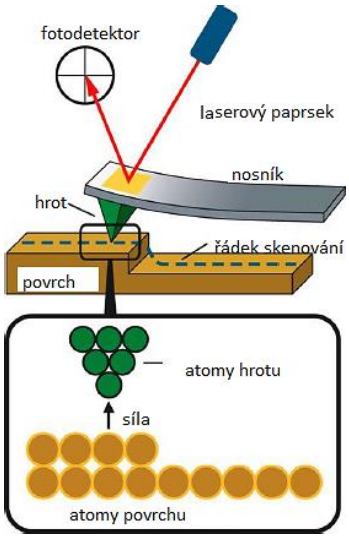


Obr. 54 Princip SEM a TEM

Oproti optickým měřicím přístrojům je zde výhodou neovlivňování měření reflexními vlastnostmi, naopak je ale potřeba dobrá elektrická a tepelná vodivost materiálu. Nevýhodou elektronových mikroskopů je také nezbytnost vakua, malá pracovní vzdálenost (čím výkonnější čočka, tím menší pracovní vzdálenost), chlazení a vysoké nároky na čistotu vzorků (Metelková, 2014).

- **Mikroskopie atomárních sil**

Mikroskopie atomárních sil (AFM nebo SFM) měří na principu vzájemné silové interakce atomů povrchu hodnoceného povrchu a hrotu měřicího přístroje. K vyhodnocení této metody je využívána téměř nepatrná výchylka měřicího hrotu, který se nachází v těsné blízkosti hodnoceného povrchu a na který působí odpudivé elektrostatické a přitažlivé Van der Waalsovy síly. Vychýlení hrotu způsobuje lehkou deformaci ohebného nosníku, kterou zaznamenává optický laserový paprsek (Obr. 55). Všechny tyto změny polohy hrotu jsou zaznamenávány počítačem a slouží k následné rekonstrukci topografie hodnoceného povrchu (Mandát, 2012; Metelková, 2014).



Obr. 55 Princip AFM

Oproti elektronovým mikroskopům tato metoda umožňuje vyšší rozlišení dat (lze zobrazovat i atomy) a současně také 3D zobrazení naměřených dat. Nevýhodou je rychlost měření, potřebná fixace vzorku, omezená velikost skenu a také potřeba antivibračních stolů, jelikož vzorky musí ležet v prostředí mimo jakýchkoli vibrací (Ústav fyziky FAST VUT, 2010; Metelková, 2014).

- **Řádkovací tunelový mikroskop**

Tato metoda je podobná mikroskopii atomárních sil s tím rozdílem, že k detekci je v tomto případě využíván elektrický proud. Mapování povrchu je uskutečněno díky pohybu vodivého hrotu nad vodivým povrchem hodnoceného objektu, kdy množství elektronů tunelovaných z materiálu do hrotu je exponenciálně závislé na vzdálenosti (Ústav fyziky FAST VUT, 2010).

- **Měření nerovnosti povrchu proudem stlačeného vzduchu**

Stupeň nerovnosti zkoumaného povrchu je zde určen vzájemným působením měřeného povrchu a energetickou ztrátou výstupního proudu (Valíček a Hloch, 2008).

- **Mikroskopie magnetických sil**

Tato metoda (MFM) funguje na principu zmagnetování hodnoceného předmětu, díky čemuž je možné snímat jeho magnetické projevy. Následnou analýzou těchto projevů lze definovat funkční vztahy charakterizující topografii povrchu (Valíček a Hloch, 2008).

7 METODIKA PRÁCE

Diplomová práce je rozdělena na dvě části – teoretická východiska a praktickou (experimentální) část.

Teoretická část se zaměřuje na zpracování informací o umělém kameni (především kategorie Solid a Quartz surface) a charakteristice procesu řezání včetně rozboru pilových kotoučů a jejich vlastností ovlivňující tento proces. Dále je zde rozebrána technologie obrábění vysokotlakým vodním paprskem, a to jak čistého, tak i s příměsí abraziva. Poslední část se zaměřuje na metody hodnocení kvality povrchu, kde jsou zejména rozebrány metody optické a dotykové.

Experimentální část probíhala v několika fázích, kdy první fází byl výběr vhodných materiálů a dekorů umělého kamene. Vzorky byly poskytnuty společností Cetecho s.r.o., která se zabývá zpracováním umělého kamene kategorie Solid surface, a výběr byl podmíněn několika faktory. Prvním faktorem byla dostatečná velikost desek, aby na nich bylo možné realizovat veškerá měření. Dalším faktorem pak byl druh materiálu, kdy bylo žádoucí provádět experiment alespoň na dvou umělých kamenech od rozdílných výrobců. S tím souvisel i výběr dekorů, kdy primárním požadavkem byly plné barvy (bílá a černá) a jeden dekor se zrnem. V kombinaci těchto všech faktorů byly vybrány tři materiály Hi-Macs (dekory Ivory White, Black a White Quartz) a jeden materiál Corian (dekor Designer White).

Následně byly vytvořeny nářezové plány a část každé desky byl zpracován vysokotlakým vodním paprskem s příměsí abraziva společností AWAC, spol. s r.o. Zbytek desek byl řezán na půdě Mendelovy univerzity v Brně v dřevařských dílnách (budova P), čemuž předcházel odborný výběr vhodných pilových kotoučů z hlediska jejich řezných charakteristik a zkušebních řezů na umělém kameni. Kvalita zkušebních řezů byla posuzována zrakem a hmatem a následovně se vybranými kotouči (K1, K2, K3, K4) provedla potřebná řezání.

Každým pilovým kotoučem bylo vedeno 5 řezů z každého dekoru, přičemž u každého pilového kotouče byly prvně změřeny poloměry otupení ostří digitálním mikroskopem VHX-5000, který je majetkem Mendelovy univerzity v Brně. Současně byly před samotným řezáním vzorků změřeny otáčky stroje a statická házivost jednotlivých kotoučů.

Statická házivost byla měřena dvěma způsoby – ručním přístrojem KINEX na formátovací pile SCM a snímačem vibrací EPRO na zkušebním stendu, z čehož vyplývá, že z důvodu měření na rozdílných strojích nemusely hodnoty vyjít shodné. Pomocí snímače vibrací EPRO byly také na stendu naměřeny vibrace při simulaci stejných otáček, jako na formátovací pile SCM. Vzorkovací frekvence snímače EPRO byla nastavena v měřicím systému LabVIEW na 1000 Hz, tedy 1000 snímků za 1 sekundu.

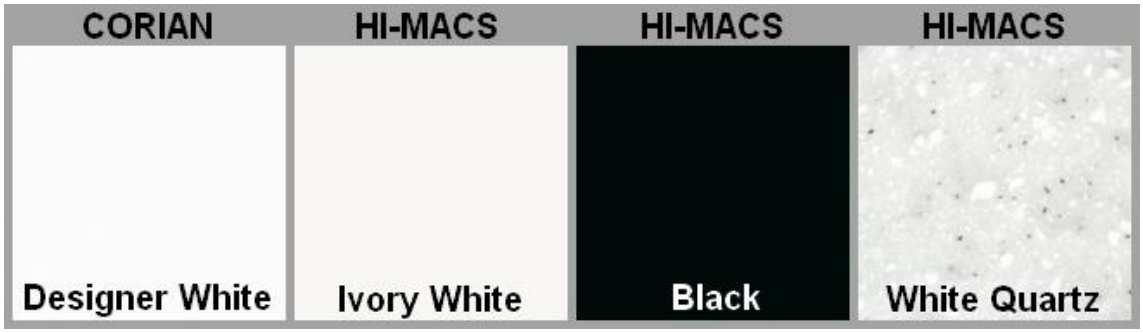
Ve výrobně společnosti Cetecho s.r.o. byly provedeny vzorové řezy, se kterými byly ve vyhodnocovací fázi experimentu posuzovány kvality řezů vybranými kotouči K1, K2, K3 a K4. Dále byly kontrolním měřením na zkušebním stendu Ústavu základního zpracování dřeva naměřeny statické házivosti všech kotoučů spolu s vibracemi při určených otáčkách.

Pro vyhodnocování byly zvoleny tři metody – přístroj Taylor Hobson Talysurf CLI, digitální mikroskop Keyence VHX-5000, který měří tvar předmětu pomocí ostření a rozostření obrazu (tzv. Focus Variation), a drsnoměr Surftest SJ-201P. První metoda byla vyloučena z důvodu nemožnosti objektivního měření materiálu Hi-Macs Black, kdy je potřeba na černé dekory červeného spektra světla, zatímco uvedený přístroj pracuje pouze se spektrem zeleným. Současně byl vyřazen i drsnoměr, a to z důvodu časové náročnosti a především kvůli širším možnostem použití digitálního mikroskopu.

Na digitálním mikroskopu byla vyhodnocována řezná spára každého vzorku, a to hloubka vyštípání horní hrany spáry a především vlnitost. Tato hodnocení probíhala na snímcích složených z 10 × 10 snímků. Na každém vzorku byly takto nasnímány tři obrazy v různých částech vzorku, na kterých se následně naměřily potřebné hodnoty (15 hodnot z každého snímku), a následně vypočítaly jejich střední hodnoty. K tomu byl využíván tabulkový procesor Excel Microsoft a statistický program STATISTICA 8 společnosti StatSoft.

7.1 Materiál

Jak již bylo uvedeno v metodice, jako materiál byl zvolen umělý kámen kategorie Solid surface obchodních značek Corian a Hi-Macs, které patří mezi nejrozšířenější výrobce. Zvolené dekory jsou uvedeny na Obr. 56.



Obr. 56 Vybrané dekory

7.2 Strojové a přístrojové vybavení

- **Formátovací pila SCM Si6n 3200**

Převážná část vzorků byla řezána na formátovací pile SCM Si 6n 3200 (Obr. 57), která je majetkem Mendelovy univerzity v Brně, a je umístěná v dřevařských dílnách v budově P. Řezání vzorků se uskutečnilo bez předřezového kotouče za použití rozvíracího klínu, který byl upevněn za samotným pilovým kotoučem. Použité kotouče byly upevněny na hřídeli vřetene mezi přírubami o průměru 82 mm. Zjištěné otáčky stroje digitálním otáčkoměrem T34 FN - HBM byly 3081 min^{-1}. Posuv obrobku do řezu byl prováděn s ručním měřením posuvné rychlosti pomocí stopek.

Obr. 57 Formátovací pila SCM Si 6n 3200

- **Formátovací pila ROJEK PF 300L**

Tato formátovací pila (Obr. 58) je majetkem společnosti Cetecho s.r.o. a byly na ni řezány referenční vzorky pro srovnání kvality řezné spáry. Stroj řezal při otáčkách 3350 min^{-1} při ručním posuvu. Pilový kotouč (K Ref.) používaný společností na jakostní řezy pro následné lepení má průměr 305 mm a 100 zubů. Z důvodu přání firmy ovšem nemohou být uvedeny další podrobnosti, jelikož pilový kotouč má zakázkově broušené zuby a jedná se o know-how firmy. Ze stejného důvodu nebylo možné změřit poloměr otupení ostří kotouče, ale mistr dílny uvedl, že na něm bylo po broušení před 14 dny nařezáno max. 50 m materiálu, tudíž by měl být ve velmi dobrém stavu.

Obr. 58 Formátovací pila ROJEK PF 300L

- **Microstep Aquacut 1501.20W**

Stroj Microstep Aquacut (Obr. 59) slouží k řezání vodním paprskem s abrazivem. Rozměry stolu jsou 4000 × 2500 mm a tryska je při řezání vzdálena od materiálu přibližně 2 mm. Veškeré nastavení stroje bylo provedeno zaměstnanci společnosti AWAC spol. s r.o. Při řezání zkušebních vzorků bylo použito abrazivum GRANAT 80 a hmotnostní tok tohoto abraziva byl 350 g/min. Pracovní tlak byl zvolen 3850 bar (3850 MPa) a vzorky byly řezány čtyřmi rychlostmi řezací hlavice – 700, 560, 420 a 280 mm/min, které odpovídají kvalitě 100 (700 mm/min), 80 (560 mm/min), 60 (420 mm/min) a 40 (280 mm/min). Je potřeba podotknout, že rychlost při řezání vodním paprskem není konstantní, ale přibližně 5 mm na obě strany od každého rohu dochází ke zpomalení hlavice na 50 % dané rychlosti.

Obr. 59 Microstep Aquacut 1501.20W (Jantač, 2014)

- **Přístroj na měření házivosti KINEX**

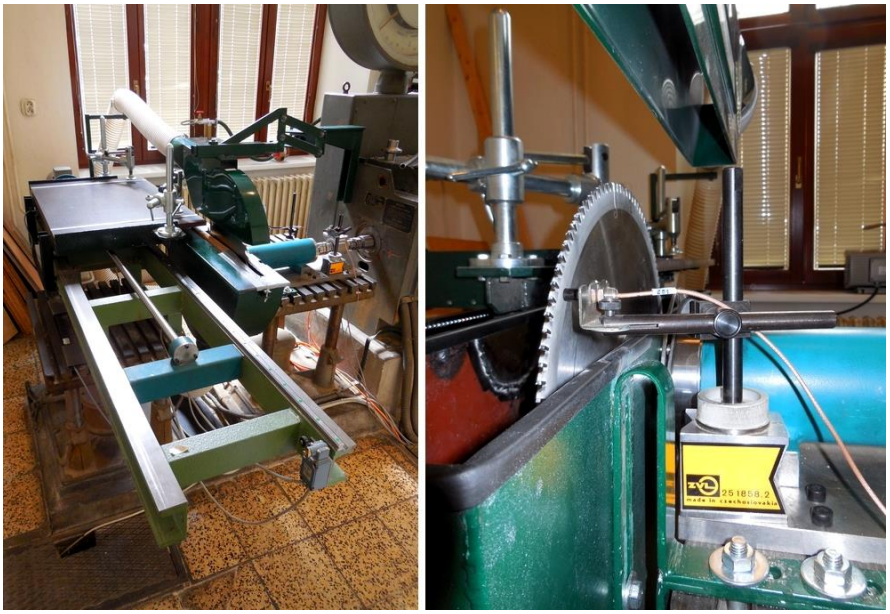
Tento ruční přístroj (setinový úchylkoměr) pro měření statické házivosti (odchylka pilového kotouče od jeho roviny při chodu naprázdno v nízkých otáčkách) byl použit pro měření na formátovací pile SCM Si6n 3200. Disponuje hrotem (Obr. 60), který se přiloží k pilovému kotouči tak, aby se navzájem dotýkaly, a následně se začne kotoučem na volno otáčet. Ručička na ukazateli hodnot se začne vychylovat na obě strany a rozdíl mezi jejími mezními polohami nám udává statickou házivost. Tato odchylka od roviny těla kotouče je přijatelná do hodnoty 0,1 mm.

Obr. 60 Přístroj KINEX, vlevo snímací hrot s ukazatelem hodnot

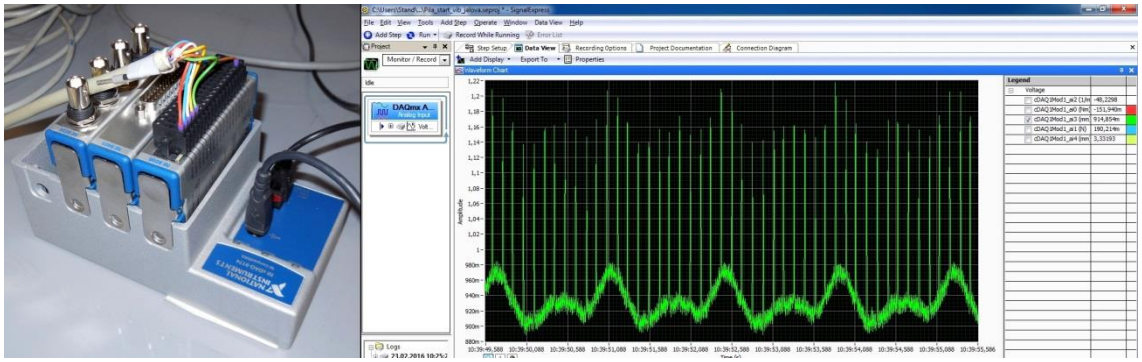
- **Zkušební stend, snímač vibrací EPRO, měřicí systém LabVIEW**

Zkušební stend (Obr. 61, vlevo) byl využit pro kontrolu velikosti statické házivosti naměřenou ručním přístrojem KINEX a současně pro měření vibrací při otáčkách naměřených na formátovací pile SCM. Vibrace byly snímány bezdotykově snímačem vibrací EPRO PR 6423/000-01, který funguje na principu vířivých proudů

(Obr. 61, vpravo). Hodnoty byly naměřeny měřicím systémem LabVIEW (Obr. 62, vlevo) a zpracovány softwarem SignalExpress (Obr. 62, vpravo), a následně byly převedeny do tabulkového procesoru Excel Microsoft.



Obr. 61 Zkušební stend (vlevo) a snímač vibrací EPRO (vpravo)



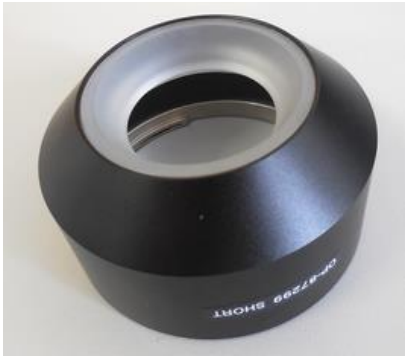
Obr. 62 Měřicí systém LabVIEW (vlevo) a graf házivosti zpracovaný v softwaru SignalExpress (vpravo)

- **Keyence VHX-5000**

Vyhodnocování řezné spáry z hlediska její vlnitosti a vyštípání horní hrany probíhalo na digitálním mikroskopu Keyence VHX-5000 (Obr. 63, vlevo), který je umístěn v biometrické laboratoři Ústavu hospodářské úpravy lesu a aplikované geoinformatiky. Mikroskop měří topografii povrchu pomocí ostření a rozostření obrazu, tzv. Focus Variation. Princip této metody je popsán v předchozí kapitole. Současně byly na mikroskopu měřeny poloměry otupení ostří řezných zubů kotoučů (Obr. 63, vpravo), viz Příloha 1 a 2.

K měření byl využíván objektiv VH-Z100, který nabízí zvětšení 100-1000x. K samotnému vyhodnocování bylo primárně využíváno zvětšení 500x, výjimku tvořily pouze vzorky nařezané vodním paprskem, které byly vyhodnocovány při zvětšení 200x, z důvodu výraznějšího přechodu v celém jejich průřezu. Z důvodu odlesků na bílých dekorech byl v některých případech použit difúzní adaptér (OP-87299 SHORT) pro rozptyl světla, který zlepšuje kvalitu snímání velmi lesklých povrchů (Obr. 64).

Obr. 63 Vyhodnocování nasnímaného povrchu (vlevo) a měření poloměru otupení ostří (vpravo) na mikroskopu VHX-5000



Obr. 64 Difúzní adaptér pro rozptyl světla (OP-87299 SHORT)

Vyhodnocován byl základní parametr *W*, neboli vlnitost, z důvodu jeho vypovídající schopnosti o rozměrnějších nerovnostech povrchu. Drsnost nebyla pro měření tak zásadní, protože vyjadřuje pouze nejmenší nerovnosti vznikající v procesu výroby, a na rozdíl od vlnitosti je spíše následkem dokončovacích technologií. Naopak vlnitost je závislá jak na vlastnostech obráběného materiálu (jeho kmitání, deformace, pnutí apod.), tak i na vlastnostech obráběcího stroje a nástroje, jako například nevyváženým a nepřesným seřízením, nedostatečnou tuhostí, házivostí hřídele či samotného pilového kotouče aj. Volba byla podmíněna faktem, že pro lepení

umělého kamene je potřeba co nejjakostnější řezná spára, aby její naleptání během procesu lepení proběhlo rovnoměrně v celém jejím průřezu.

Měření na mikroskopu VHX-5000 běžně probíhalo následujícím postupem:

1) po zapnutí přístroje byla provedena inicializace mikroskopu, tj. nastavení počátečních hodnot,

2) očištění zkušebního vzorku a vložení do mikroskopu,

3) nastavení rozsahu 10 × 10 snímků (v případě vzorků řezaných vodním paprskem 7 × 15 snímků), tzv. „stitching“ (spojování snímků),

4) nastavení horní a dolní hranice ostření mikroskopu a zahájení měření,

5) v rozsahu nastaveném v předešlém kroku následně mikroskop snímek po snímku zaostřuje plochu a postupně jednotlivé snímky skládá dohromady,

6) uložení hotového složeného snímku (ukázky snímků viz Příloha 3–6) a následné vyhodnocování naměřených vzorků, kdy získané hodnoty byly přepisovány do tabulkového procesoru Excel Microsoft.

Vyhodnocování naměřených vzorků bylo prováděno dvěma způsoby, a to podle metody obrábění. Pro vzorky dělené pilovými kotouči byly v softwaru mikroskopu zjišťovány hodnoty:

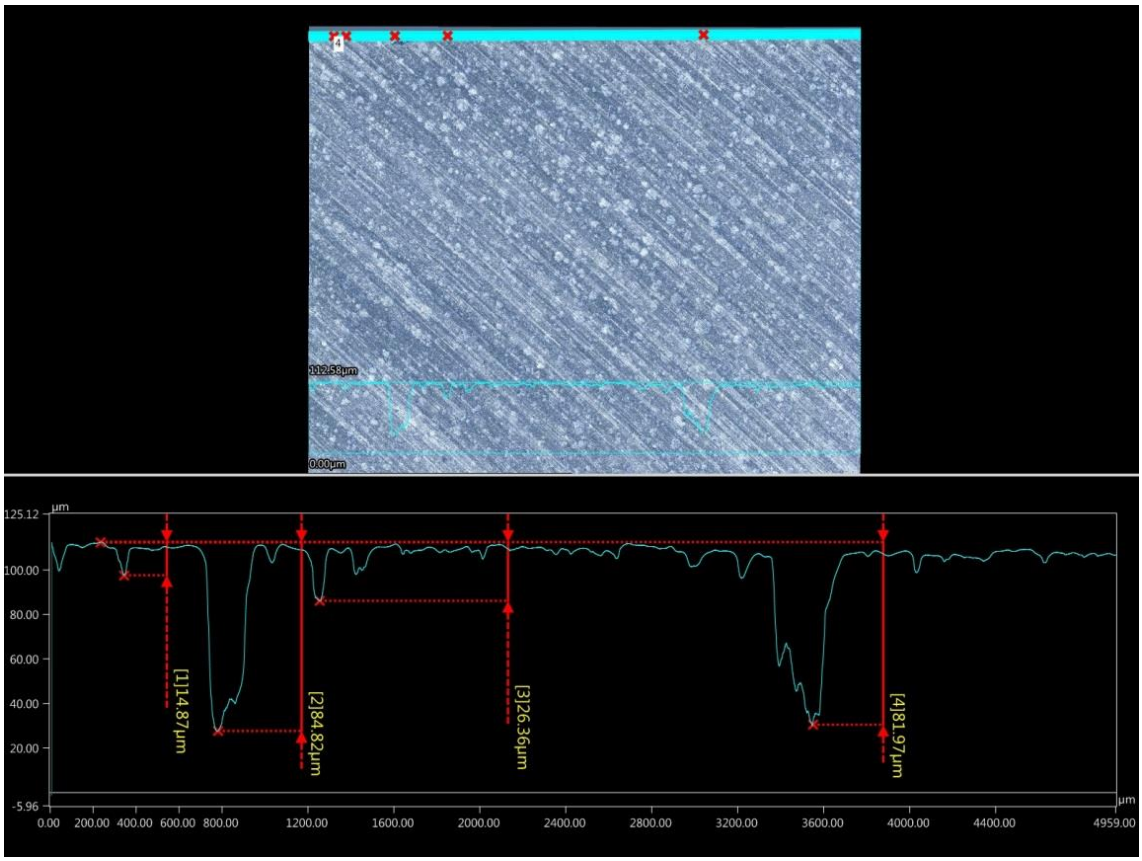
a) hloubky vyštípání horní hrany vzorku (prokládání obrazu přímkou vodorovnou s hranou vzorku, viz Obr. 65),

b) vlnitosti (prokládání obrazu přímkou kolmou na stopy zubů, viz Obr. 66).

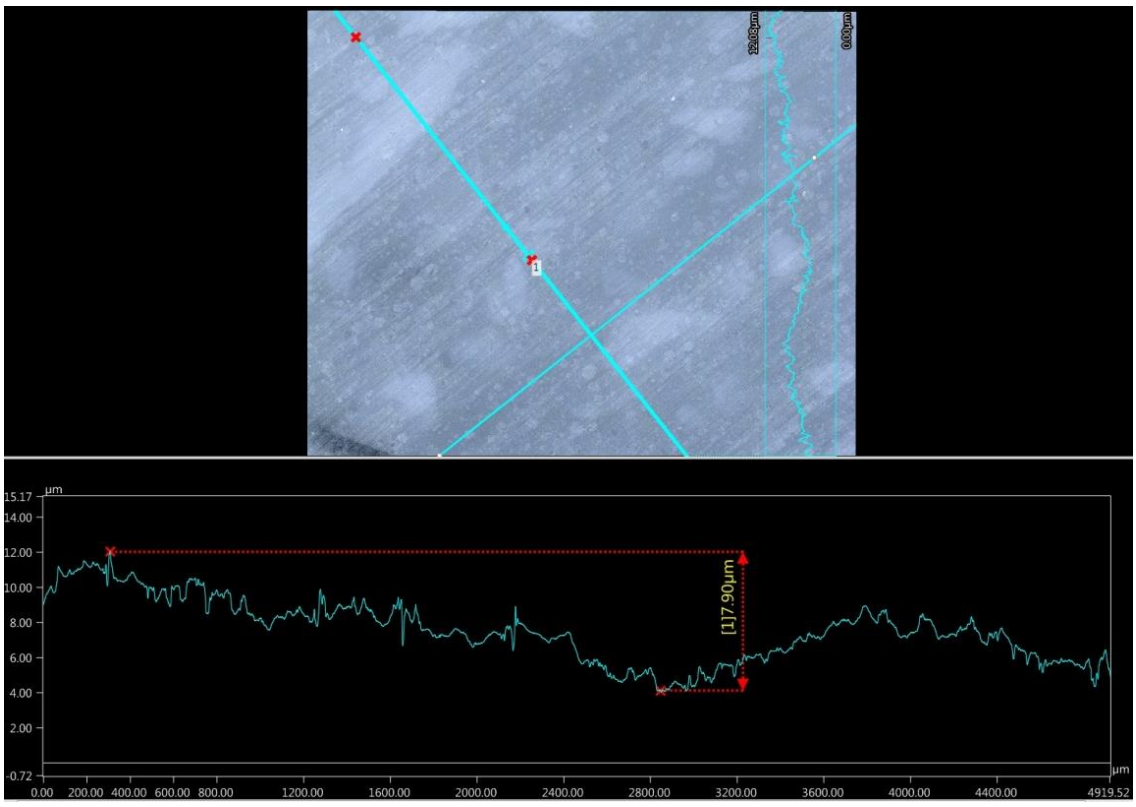
Pro vzorky dělené vodním abrazivním paprskem byly zjišťovány hodnoty:

a) míra zaoblení horní hrany vzorku způsobená vstupem paprsku do materiálu (prokládání obrazu přímkou vodorovnou s hranou vzorku, viz Obr. 67),

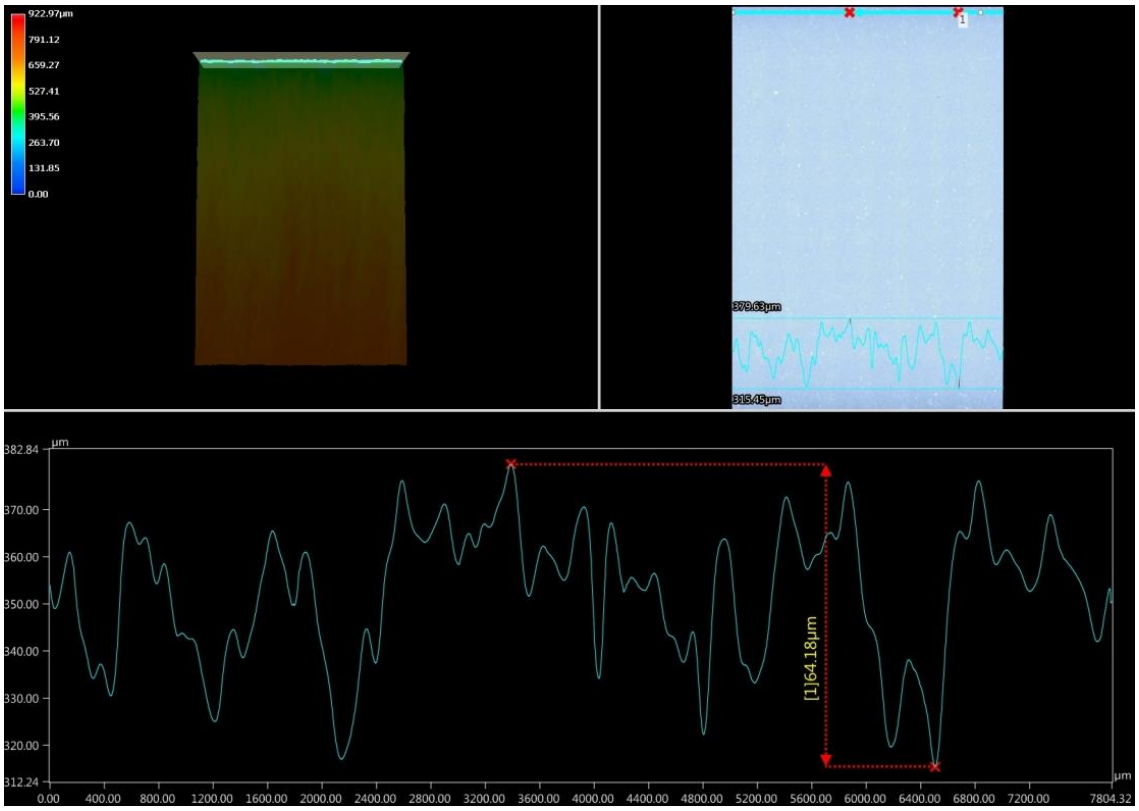
b) celkového tvaru profilu vzorku (prokládání obrazu přímkou kolmou na hranu vzorku, viz Obr. 68).



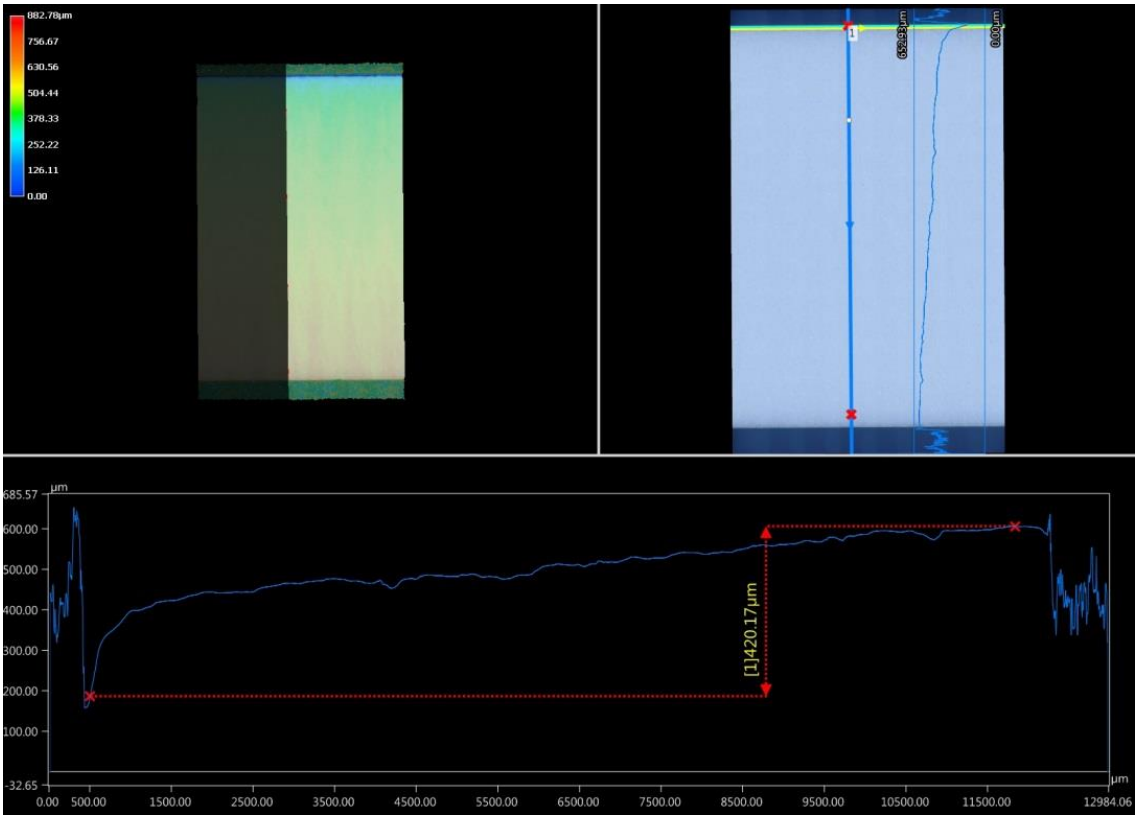
Obr. 65 Hloubka vyštípání horní hrany materiálu Hi-Macs Black děleným pilovým kotoučem firmy Cetecho s.r.o. (K Ref.)



Obr. 66 Vlnitost materiál Hi-Macs White Quartz děleným kotouče K3



Obr. 67 Míra zaoblení horní hrany materiálu Hi-Macs Ivory White děleným AWJ

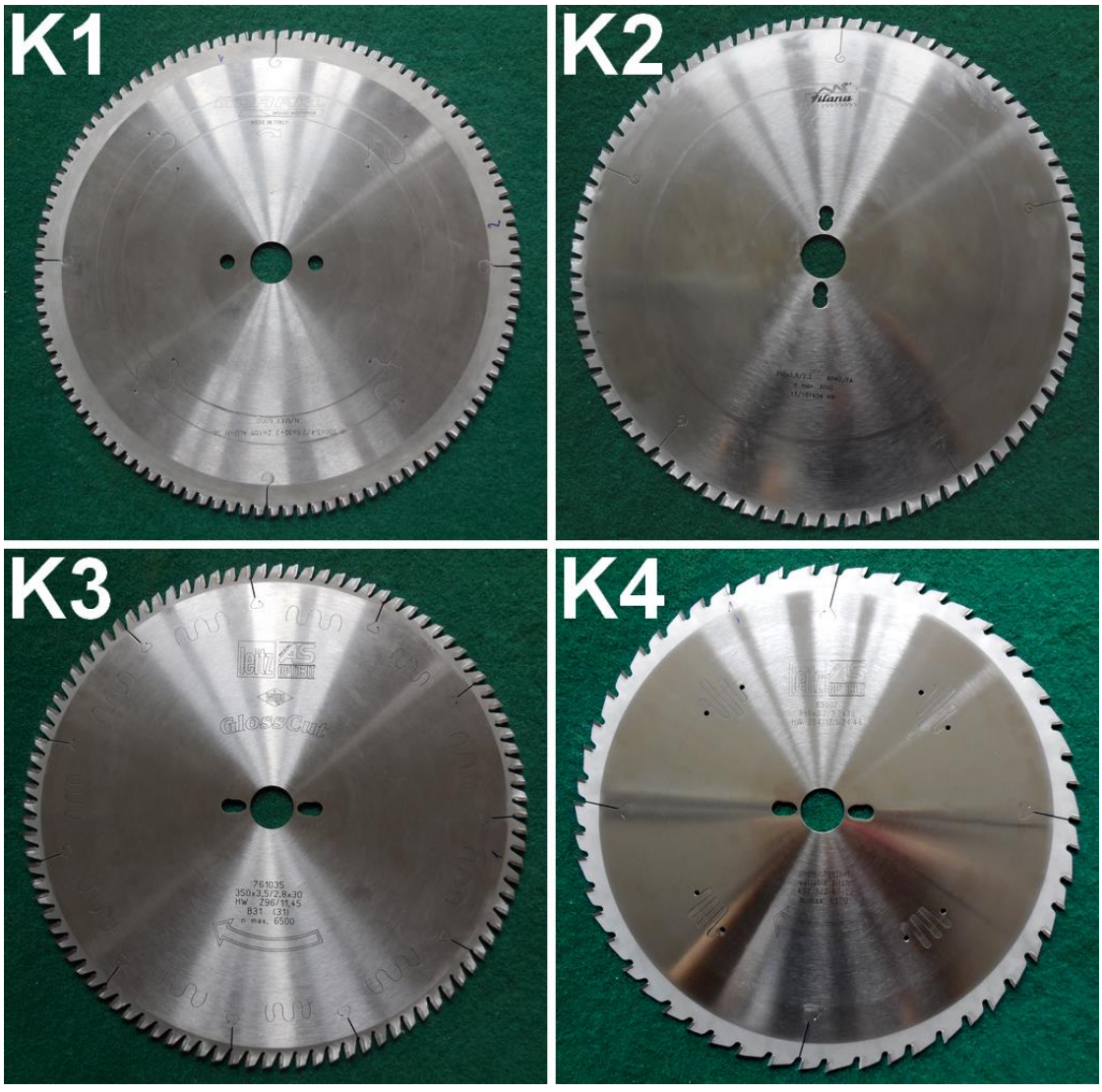


Obr. 68 Celkový tvar profilu materiálu Corian Designer White děleným AWJ

7.3 Použité pilové kotouče

K měření byly použity čtyři druhy pilových kotoučů s označením K1, K2, K3 a K4 (Obr. 69) o stejném průměru 350 mm a průměru otvoru pro upnutí hřídele 30 mm. Současně mají všechny čtyři kotouče zuby opatřeny SK plátky. Přehled jejich parametrů je uveden v Tab. 11.

Jak již bylo zmíněno, parametry pilového kotouče, který nařezal referenční vzorky, nelze zveřejnit z důvodu přání společnosti Cetecho s.r.o.



Obr. 69 Kotouče K1, K2, K3 a K4

Tab. 11 Přehled parametrů vybraných pilových kotoučů

			K1	K2	K3	K4
			GDA Pikl ALU NEG SIL	Pilana DRY CUT	Leitz GlossCut	Leitz AS OptiCut UT
Průměr pilového kotouče	D	[mm]	350	350	350	350
Počet zubů	z		108	80	96	54
Průměr upínací díry	d_u	[mm]	30	30	30	30
Šířka těla kotouče	s	[mm]	2,6	2,2	2,8	2,2
Šířka zubu	s_r	[mm]	3,4	2,6	3,5	3,2
Výška zubu	h	[mm]	8	9	11	9
Rozteč zubu	t	[mm]	10	14	11	nepravidelná
Radiální kompenzační drážky			4	5	11	4
Odhlučňovací drážky			4	-	11	2
Kompenzační válcování			dvojité	jednoduché	-	jednoduché
Úhel hřbetu	α	[°]	10	15	20	-
Úhel břitu	β	[°]	85	72	75	-
Úhel čela	γ	[°]	-5	3	-5	10
Maximální otáčky	n_{max}	[min^{-1}]	6 000	3 000	6 500	6 500
Prům. poloměr otupení ostří	ρ	[μm]	9,2	20,3	10,6	7,3
Pořizovací cena		[Kč]	2 101	1 377	3 554	2 579

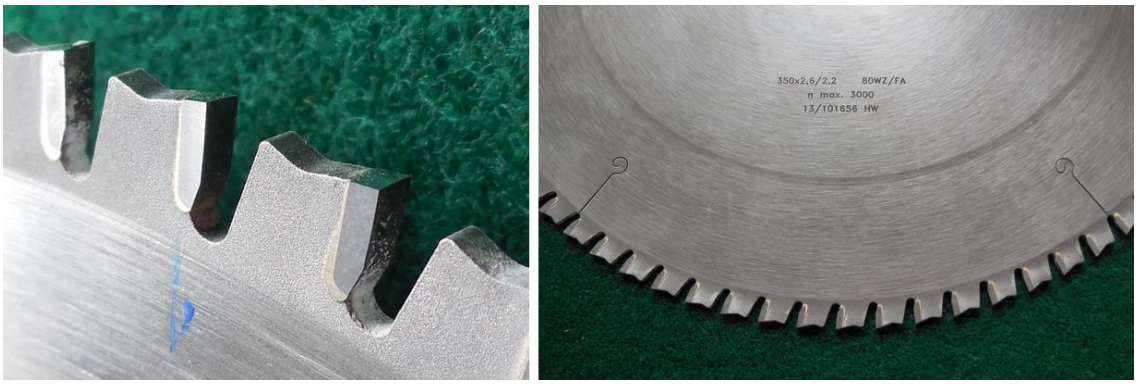
- **Pilový kotouč K1 – GDA Pikl ALU NEG SIL**

Pilový kotouč K1 má trapézové zuby střídavě se zuby rovnými s negativním úhlem čela, a je primárně určen na řezání neželezných kovů a plastů, popř. slitin hliníku. Jeho výběr byl podmíněn faktem, že vybrané umělé kameny typu Solid surface jsou z přibližně 2/3 složeny z trihydrátu hliníku, který se získává z bauxitu, a také záporným úhlem čela, který je žádoucí pro obrábění umělého kamene. Disponuje dvojitým kompenzačním válcováním, které by mělo lépe rozkládat napětí v kotouči.

Obr. 70 Pilový kotouč K1 – zuby a úpravy těla kotouče

- **Pilový kotouč K2 – Pilana DRY CUT**

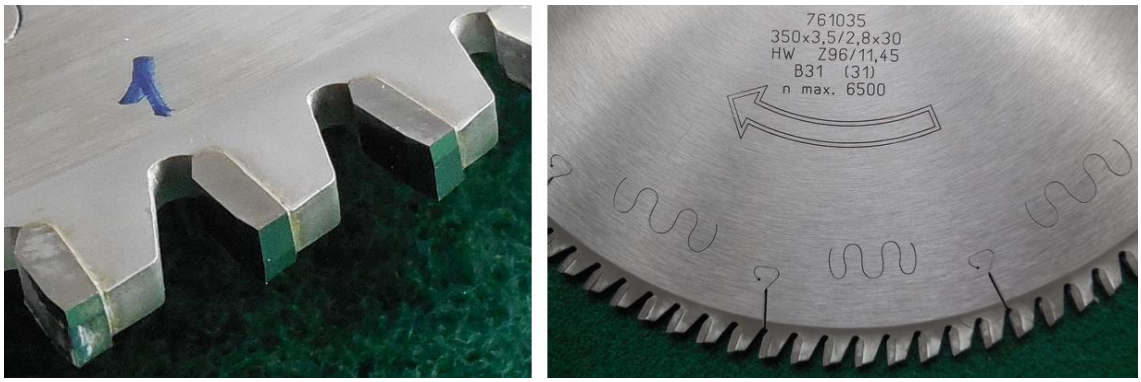
Pilový kotouč K2 má střídavě šikmé zuby s omezovačem třísky a je vhodný pro řezání stavebních materiálů (PVC, akryláty, plexisklo, tenké ocelové profily). Jeho výběr byl podmíněn primárně faktem, že vybrané umělé kameny typu Solid surface jsou z cca 1/3 tvořeny akrylátovou pryskyřicí. Současně byl zvolen tento kotouč díky své vhodností pro ruční posuv.



Obr. 71 Pilový kotouč K2 – zuby a úpravy těla kotouče

- **Pilový kotouč K3 – Leitz GlossCut**

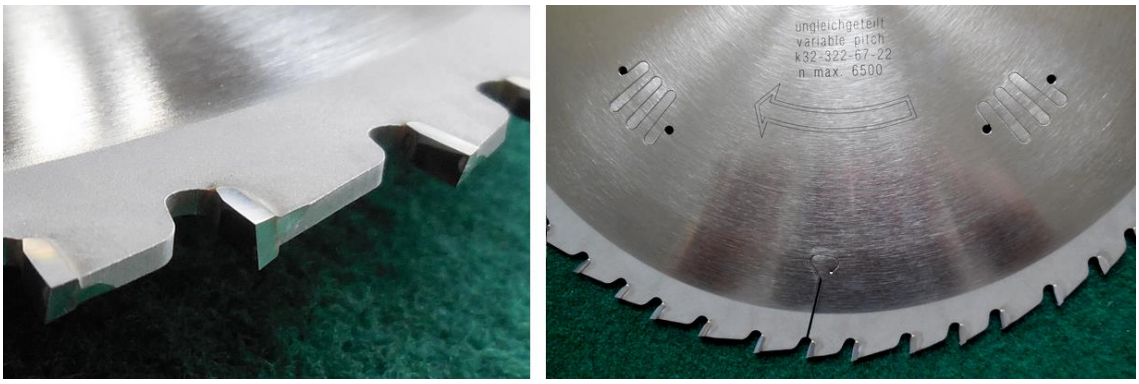
Pilový kotouč K3 disponuje speciální geometrií zubů a specifickými odhlučňovacími ornamenty (vlnovky v tangenciálním směru), kterých je na těle kotouče jedenáct, stejně jako počet kompenzačních drážek. Odhlučňovací elementy dle výrobce snižují hlučnost až o 4 dB při volném chodu. Kotouč má střídavé zešikmení hřbetů zubů, díky čemuž jeden zub slouží k předřezání, a následující k začištění řezu. Dále má záporný úhel čela, který je žádoucí pro obrábění umělého kamene, spolu s lomenou čelní plochu (standardně bývá rovná) o velikosti 3°. Díky této geometrii kotouč disponuje dvěma řeznými úhly. Kotouč není kompenzačně válcovaný, ale zato je celá plocha vybroušená. Jeho výběr byl podmíněn jeho vhodností pro kvalitní konečné řezy plastů (např. PMMA, polykarbonáty) a plastových/hliníkových kompozitů.



Obr. 72 Pilový kotouč K3 – zuby a úpravy těla kotouče

- **Pilový kotouč K4 – Leitz AS OptiCut UT**

Pilový kotouč K4 má střídavě šikmé zuby s nepravidelnou roztečí a speciální odhlučňovací ornamenty na těle kotouče, které by dle výrobce měly snižovat hlučnost při volném chodu až o 8 dB. Jeho použití je univerzální a zvolen byl z důvodu nepravidelné rozteče zubů, která mívá díky rozdílné tloušťce odebírané třísky pozitivní vliv na výslednou kvalitu povrchu.



Obr. 73 Pilový kotouč K4 – zuby a úpravy těla kotouče

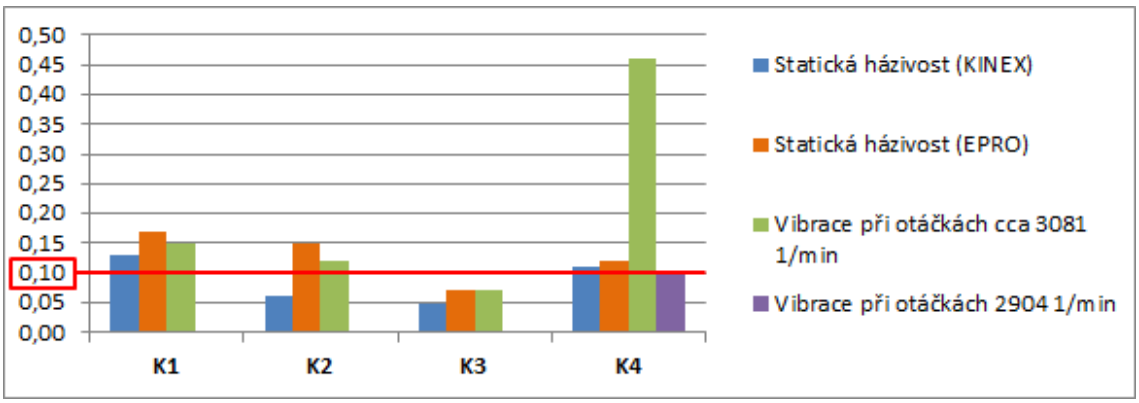
8 VÝSLEDKY

8.1 Statická házivost a vibrace v daných otáčkách

Naměřené hodnoty statické házivosti pilových kotoučů podávají informaci o odchylkách kotoučů od jejich roviny při nízkých otáčkách (průměrně 42 min^{-1}) během chodu naprázdno, a mají vliv na výslednou kvalitu řezné spáry. Maximální hodnoty odchylek by dle výrobců neměly přesahovat hodnotu 0,1 mm od roviny těla kotouče.

Statická házivost byla měřena při průměrných otáčkách 42 min^{-1}, kdy uvedené kritérium rozptylu házivosti splňoval pouze kotouč K3, ostatní kotouče nevyhovovaly. Kotouč K2 sice vyhovoval při ručním měření na pile SCM, při kontrolním měření na zkušebním stendu měl ovšem rozptyl házivosti více než dvojnásobný. To mohlo být způsobeno rozdílnou konstrukcí stroje, kdy mohlo například hrát roli vychýlení vřetene nebo nedostatečná tuhost stroje. Těsně nad limitem rozptylu házivosti 0,1 mm byl kotouč K4, zatímco kotouč K1 měl výsledky nejhorší.

Vibrace při daných otáčkách (přibližně 3081 min^{-1}) byly měřeny pouze na zkušebním stendu a kritérium rozptylu házivosti splňoval opět pouze kotouč K3. Lehce nad limitem byl kotouč K2 a následně K1, přičemž hodnoty byly nižší než při měření statické házivosti. To bylo pravděpodobně způsobeno odstředivou silou, díky které se kotouče při vyšších otáčkách vytužily. Nejhorší výsledky měl kotouč K4, což ale bylo způsobeno chodem kotouče v rezonančních otáčkách, které celkově negativně ovlivňuje proces řezání, a to z jak hlediska výsledné kvality řezní spáry, tak i z důvodu negativního vlivu na samotný nástroj (zahřívání, otupování, aj.). Při snížení otáček na 2904 min^{-1} se kotouč choval normálně a rozptyl házivosti nabyl hodnoty 0,1 mm.

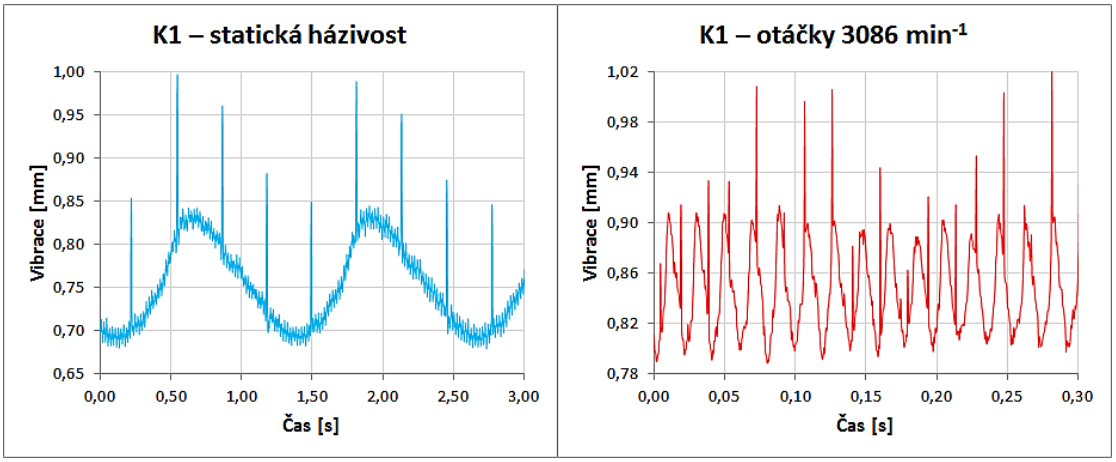


Obr. 74 Přehled vibrací [mm] jednotlivých kotoučů při rozdílných měřeních

- **Pilový kotouč K1**

Tab. 12 Statická házivost a vibrace kotouče K1

Statická házivost měřená přístrojem KINEX	[mm]	0,13
Statická házivost měřená LabVIEW SignalExpress	[mm]	0,17
Vibrace při otáčkách 3086 min^{-1}	[mm]	0,15

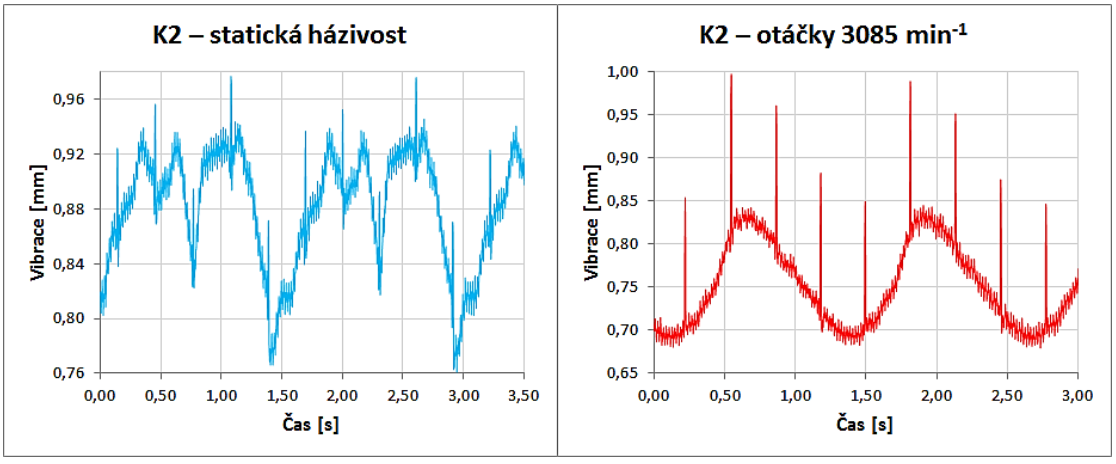


Obr. 75 Statická házivost a vibrace při daných otáčkách kotouče K1

- **Pilový kotouč K2**

Tab. 13 Statická házivost a vibrace kotouče K2

Statická házivost měřená přístrojem KINEX	[mm]	0,06
Statická házivost měřená LabVIEW SignalExpress	[mm]	0,15
Vibrace při otáčkách 3085 min^{-1}	[mm]	0,12

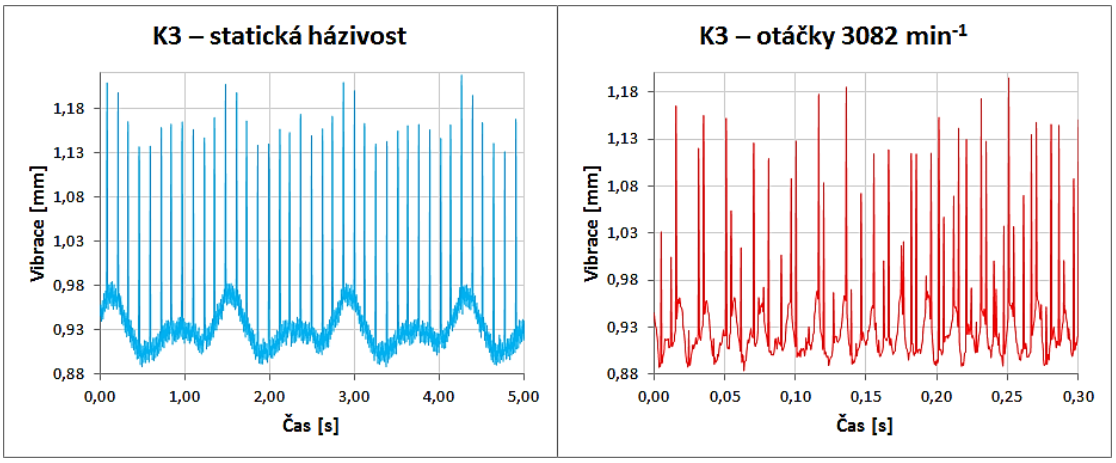


Obr. 76 Statická házivost a vibrace při daných otáčkách kotouče K2

- **Pilový kotouč K3**

Tab. 14 Statická házivost a vibrace kotouče K3

Statická házivost měřená přístrojem KINEX	[mm]	0,05
Statická házivost měřená LabVIEW SignalExpress	[mm]	0,07
Vibrace při otáčkách 3082 min^{-1}	[mm]	0,07

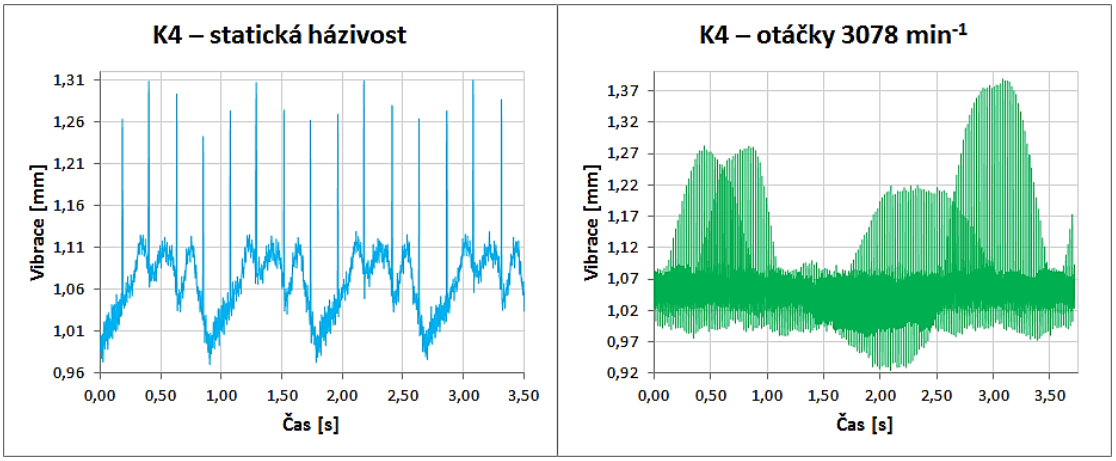


Obr. 77 Statická házivost a vibrace při daných otáčkách kotouče K3

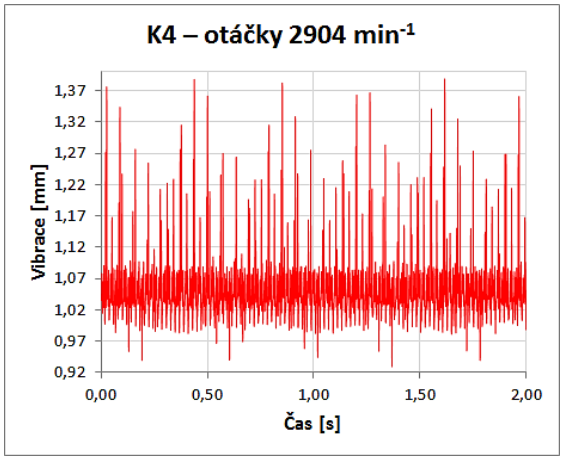
- **Pilový kotouč K4**

Tab. 15 Statická házivost a vibrace kotouče K4

Statická házivost měřená přístrojem KINEX	[mm]	0,11
Statická házivost měřená LabVIEW SignalExpress	[mm]	0,12
Vibrace při otáčkách 3078 min^{-1}	[mm]	0,46
Vibrace při otáčkách 2904 min^{-1}	[mm]	0,10



Obr. 78 Statická házivost a vibrace při daných otáčkách (rezonanční otáčky) kotouče K4



Obr. 79 Vibrace při daných otáčkách kotouče K4

8.2 Vyhodnocení vlivu použitých technologií na kvalitu řezné spáry

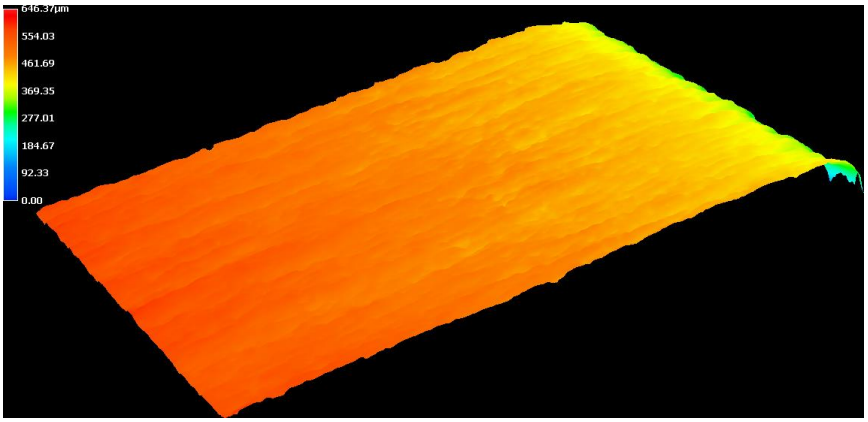
Pro srovnání kvality řezných spár dělených pilovými kotouči a abrazivním vodním paprskem stačila primárně pouze srovnávací metoda hodnocení kvality. Zrakem byly viditelné stopy paprsku ve spáře (Obr. 80) a současně při posouzení hmatem byly tyto vzorky oproti vzorkům řezaných na pile doslova hrubé.

Obr. 80 Ukázka řezných spár vzorků dělených abrazivním vodním paprskem

Z horní hrany (strana, kde vodní paprsek vstupuje do materiálu) byl vždy znatelný větší úběr materiálu, než se paprsek v hraně ustálil (Obr. 81). Nelze stoprocentně říct, že množství tohoto úběru závisí na rychlosti paprsku, nicméně naměřené hodnoty u tří materiálů nasvědčují tomu, že s narůstající rychlostí se množství úběru zmenšuje. Toto pravidlo nebylo potvrzeno u materiálu Corian Designer White, což ale mohlo být způsobeno špatným nasnímáním povrchu nebo nepřesným proložením přímky rovnoběžné s horní hranou v pracovním softwaru mikroskopu VHX-5000 (Tab. 16).

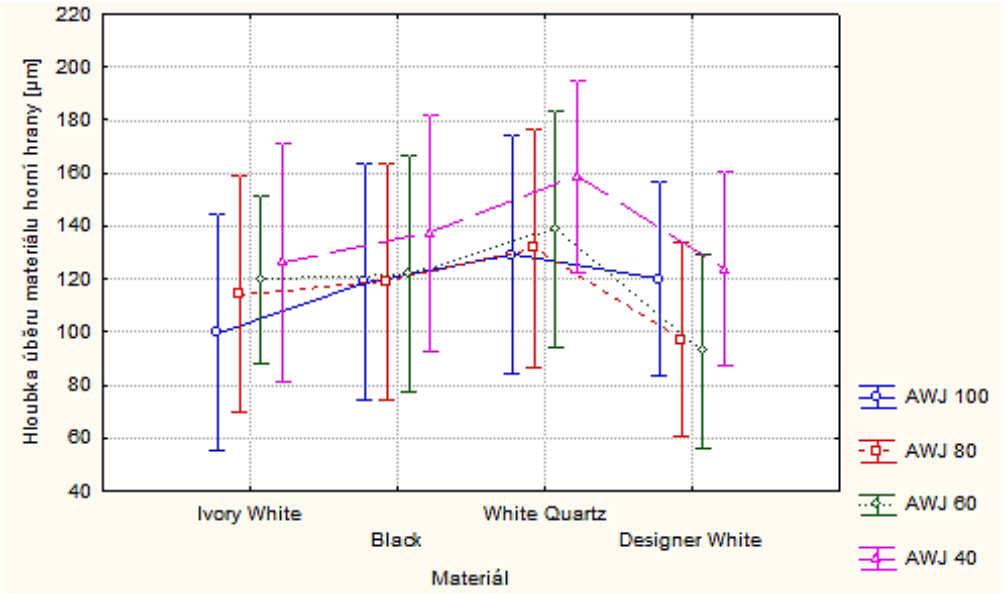
Tab. 16 Střední hodnoty hloubky úběru materiálu horní hrany vzorku při řezání AWJ

	Střední hodnoty hloubky úběru materiálu horní hrany [μm]			
	AWJ 100	**AWJ 80**	**AWJ 60**	**AWJ 40**
Hi-Macs Ivory White	99,72	114,30	120,03	126,33
Hi-Macs Black	118,96	119,15	121,82	137,44
Hi-Macs White Quartz	129,26	131,64	138,96	148,75
Corian Designer White	114,84	101,89	90,17	129,24
Střední hodnoty	**115,70**	**116,74**	**117,74**	**135,44**



Obr. 81 3D zobrazení řezné spáry materiálu Hi-Macs Black řezaným AWJ 100

Pro komplexní pohled na hloubku úběru materiálu horní hrany v závislosti na rychlosti vodního paprsku a samotných materiálů je zobrazen na Obr. 82 statistickým testem ANOVA. Zde je možné vidět, že ačkoliv pro rychlost AWJ 40 opravdu platí nejvyšší míra úběru materiálu horní hrany, z hlediska řezaných materiálů se jejich všechny intervaly spolehlivosti prolínají, tudíž zde nejsou žádné statisticky významně odlišné střední hodnoty základních souborů. Tvrzení potvrdil i kontrolní Scheffého test mnohonásobného porovnání, tedy že nejsou statisticky významně odlišné střední hodnoty jednotlivých dělených materiálů a rychlostí vodního paprsku v závislosti na úběru materiálu horní hrany.



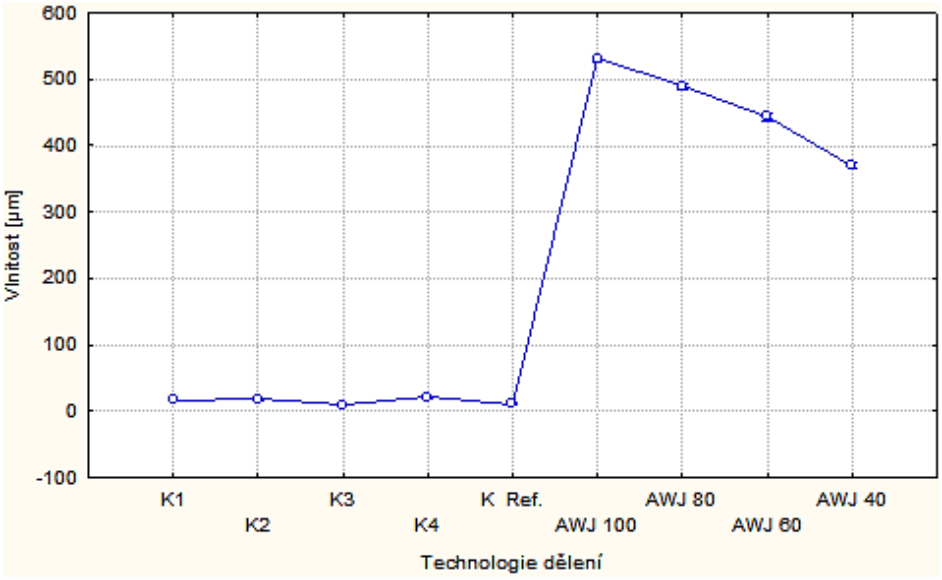
Obr. 82 Vliv materiálu a rychlosti vodního paprsku na hloubku úběru materiálu horní hrany materiálu

Statistické vyhodnocení všech použitých technologií dělení je znázorněno na Obr. 83. Z důvodu výrazných rozdílů hodnot vlnitosti nejsou v grafu dobře viditelné

intervaly spolehlivosti, ale jen aritmetické průměry (modrá kolečka) jednotlivých technologií. Hlavní informací z grafu a Tab. 17 je, že vlnitost klesá v závislosti na snižování rychlosti vodního paprsku. Ačkoliv je teda se snižující se rychlostí vyšší kvalita řezné spáry, narůstá naopak množství úběru materiálu z horní (a současně kvalitnější) hrany. Současně je kvalita řezné spáry při dělení vodním paprskem stále mnohonásobně nižší než při běžném řezání pilovými kotouči.

Tab. 17 Střední hodnoty vlnitosti materiálů při řezání AWJ

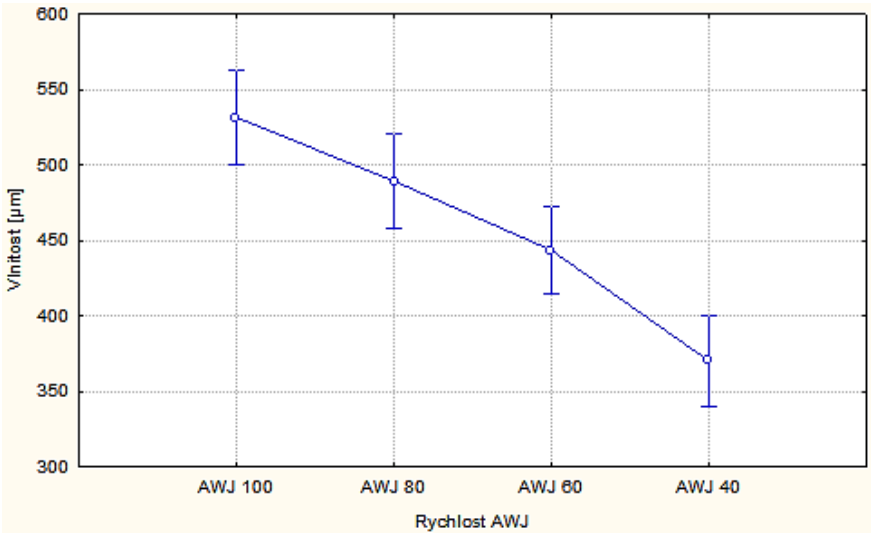
	Střední hodnoty vlnitosti [µm]			
	AWJ 100	**AWJ 80**	**AWJ 60**	**AWJ 40**
Hi-Macs Ivory White	552,99	507,12	437,33	373,23
Hi-Macs Black	510,14	477,74	463,19	363,35
Hi-Macs White Quartz	547,01	516,01	501,01	388,41
Corian Designer White	510,42	464,26	365,43	357,10
Střední hodnoty	**530,14**	**491,28**	**441,74**	**370,52**



Obr. 83 Vliv technologie dělení na vlnitost řezné spáry

Z důvodu nemožnosti z Obr. 83 vyčíst intervaly spolehlivosti, je detailnější pohled na chování rychlosti vodního paprsku v závislosti na vlnitosti řezné spáry uveden na Obr. 84. Zde je vidět, že statisticky nevýznamně odlišné střední hodnoty základních souborů mají rychlosti AWJ 100 (700 mm/min) a AWJ 80 (560 mm/min), a to kvůli protínajícím se intervalům spolehlivosti. Stejný případ platí i pro rychlosti AWJ 80 s rychlostí AWJ 60 (420 mm/min). Z grafu lze vyčíst, že jediný statisticky zcela nezávislý na ostatních středních hodnotách, a tudíž i s významně odlišnými středními hodnotami, je rychlost vodního paprsku AWJ 40 (280 mm/min). Z hlediska

vlivu jednotlivých materiálů na vlnitost řezné spáry zde nebyly prokázány žádné statisticky významné rozdíly (viz Příloha 7), ačkoliv stejně jako u hloubky úběru materiálu z horní hrany všechny rychlosti lehce (a tedy statisticky nevýznamně) narůstají při dělení dekoru se zrnem – Hi-Macs White Quartz. To bylo potvrzeno i kontrolním Scheffého testem.



Obr. 84 Vliv rychlosti abrazivního vodního paprsku na vlnitost řezné spáry

Vzájemné srovnání jednotlivých pilových kotoučů je z důvodu přehlednosti rozebráno v následujících kapitolách.

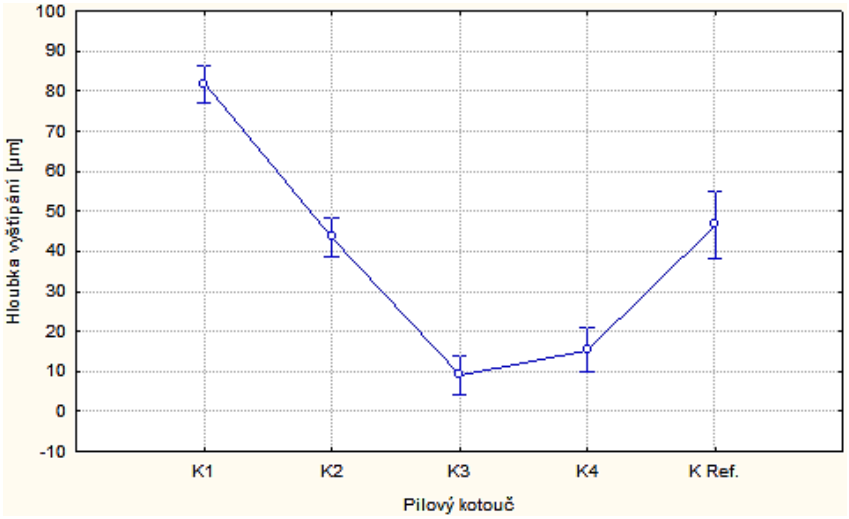
8.3 Srovnání hloubky vyštípaní horní hrany dělených materiálů

Řezání na obou formátovacích pilách probíhalo za podobných podmínek, kdy posuv obrobku do řezu byl prováděn ručně. Řezná rychlost byla na pile ROJEK v_c = 53,5 m·s^{-1}, na pile SCM v_c = 56,4 m·s^{-1}. Průměrná posuvná rychlost byla dodržována na průměrných v_f = 3 m·min^{-1} a posuv na zub byl průměrně f_z = 0,01 mm.

Kromě hlavního zjišťovaného parametru vlnitosti byla u vzorků řezaných pilovými kotouči vyhodnocována i míra vyštípaní horní hrany materiálu. V porovnání s referenčním kotoučem vyštipují kotouče K3 a K4 materiál méně a z hlediska intervalu spolehlivosti stejnou mírou. Kotouč K2 má míru vyštípání statisticky shodnou jako referenční kotouč, zatímco K1 vyšel zdaleka nejhůře.

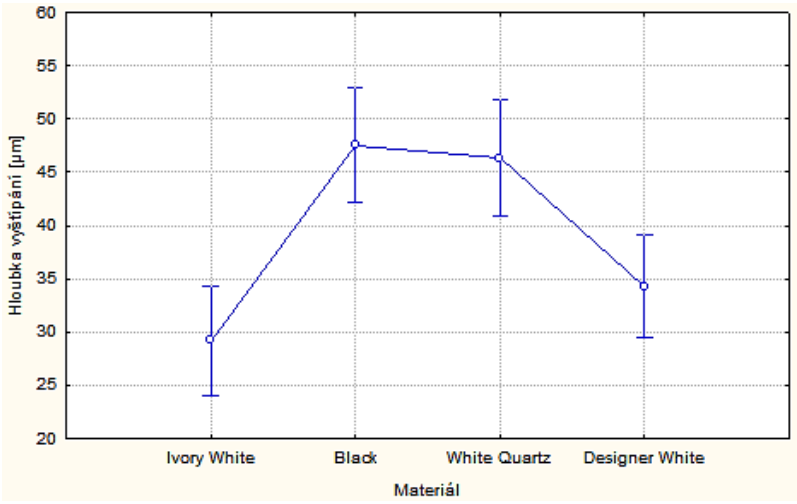
Tab. 18 Střední hodnoty hloubky vyštípání horní hrany při řezání pilovými kotouči

	Střední hodnoty hloubky vyštípání horní hrany [µm]				
	K1	K2	K3	K4	K Ref.
Hi-Macs Ivory White	46,88	17,37	11,81	12,54	56,34
Hi-Macs Black	112,35	69,87	6,38	16,57	32,41
Hi-Macs White Quartz	86,34	51,16	10,87	15,62	67,79
Corian Designer White	81,57	35,00	7,42	16,69	30,49
Střední hodnoty	**81,78**	**43,35**	**9,12**	**15,36**	**46,76**



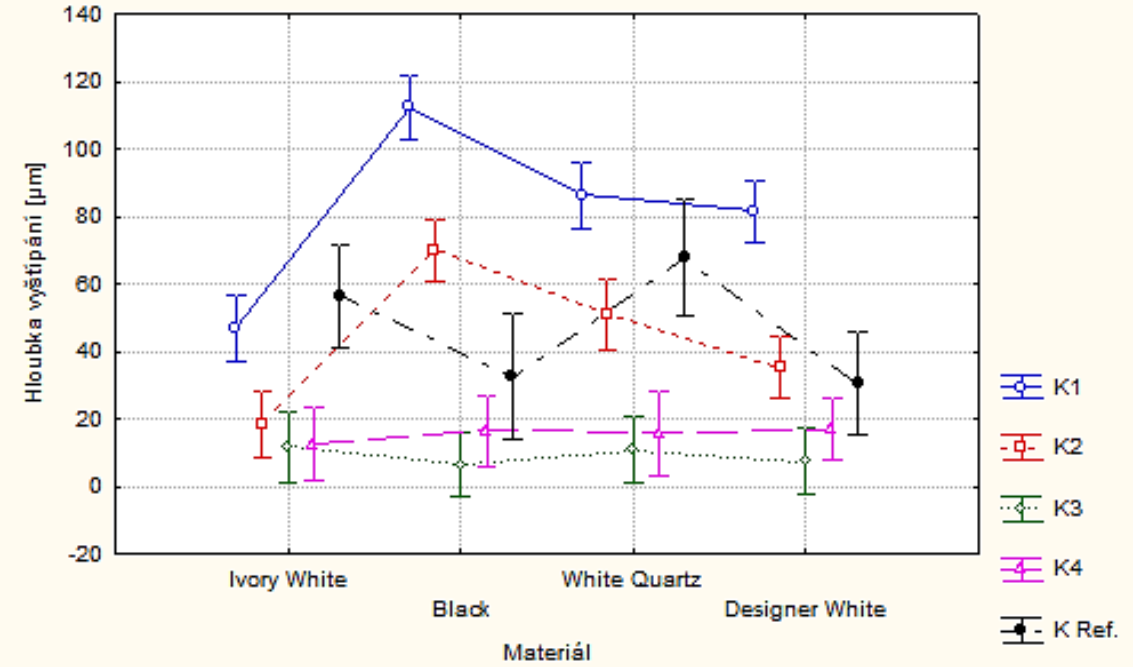
Obr. 85 Vliv pilového kotouče na hloubku vyštípání horní hrany materiálu

Hloubka vyštípání horní hrany vzorků nemá tak zásadní vliv na samotnou lepenou spáru, nicméně z ní lze částečně vyčíst vlastnosti jednotlivých materiálů a dekorů. Uvedený graf, viz Obr. 86, podává informaci o středních hodnotách daných dekorů. Dekory Ivory White a Designer White mají statisticky nevýznamně odlišné střední hodnoty svých základních souborů, tudíž lze jejich střední hodnoty považovat za shodné. To stejné platí o dekorech Black a White Quartz materiálu Hi-Macs.



Obr. 86 Vliv materiálu na hloubku vyštípání horní hrany

Zajímavým pohledem na míru vyštípání z hlediska použitých pilových kotoučů je na Obr. 87, kde je vidět, že kotouče K3 a K4 vyštipují materiál v podstatě nezávisle na druhu děleného materiálu. Referenční kotouč lze v podstatě také zařadit do stejné kategorie, až na významně odlišnější rozdíly mezi materiály Hi-Macs White Quartz a Corian Designer White. Největší variabilitu výsledné hloubky vyštípání z hlediska řezaných materiálů mají kotouče K1 a K2, a to K1 nejvyšší.



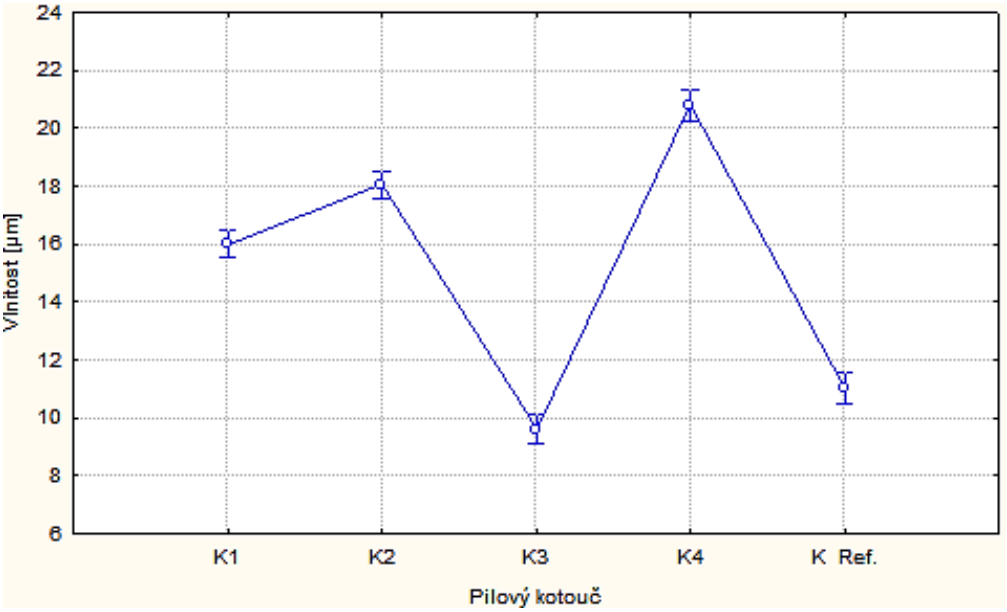
Obr. 87 Vliv materiálu a použitého pilového kotouče na hloubku vyštípání horní hrany materiálu

8.4 Srovnání kvality řezných spár z hlediska použitých materiálů

Vlnitost, která je zásadní pro posouzení kvality řezné spáry, je u spár dělených referenčním kotoučem vyšší, ačkoliv nijak markantně, než na spárách řezaných kotoučem K3. Nicméně se jejich intervaly spolehlivosti nepřekrývají, tudíž mají statisticky významně odlišné střední hodnoty svých základních souborů. To se týká i ostatních kotoučů, kdy žádné jejich střední hodnoty jejich základních souborů se nedají považovat za shodné. Z kvalitativního hlediska řezné spáry jsou tedy ostatní kotouče horší, než kotouč referenční, a to v následujícím pořadí: K1, K2 a K4. Všechna tvrzení byla opět ověřena Scheffého testem mnohonásobného porovnání.

Tab. 19 Střední hodnoty vlnitosti materiálů při řezání pilovými kotouči

	Střední hodnoty vlnitosti [µm]				
	K1	**K2**	**K3**	**K4**	**K Ref.**
Hi-Macs Ivory White	16,12	17,48	12,32	20,98	12,26
Hi-Macs Black	14,46	17,05	8,31	16,79	12,30
Hi-Macs White Quartz	17,64	21,11	8,76	19,16	9,91
Corian Designer White	15,82	16,53	9,07	26,28	9,59
Střední hodnoty	**16,01**	**18,04**	**9,61**	**20,80**	**11,01**

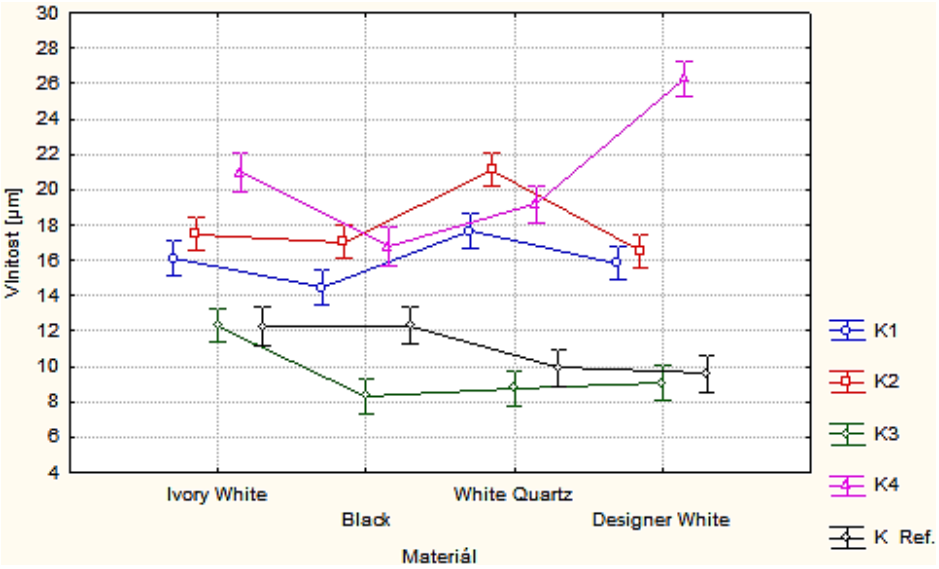


Obr. 88 Vliv pilového kotouče na vlnitost řezné spáry

Z hlediska materiálů naopak vyšel dekor Black nejlépe. Ostatní tři dekory mají ze statistického hlediska shodné střední hodnoty svých základních souborů.

Obr. 89 Vliv materiálu na vlnitost řezné spáry

Pro komplexnější pohled na vlnitost řezné spáry je zde uveden Obr. 90. Zde je opět viditelné, že kotouče K1 a K2 mají z hlediska obráběných materiálů podobné chování a u bílých dekorů Ivory White a Designer White i shodné střední hodnoty jejich základních souborů. Vzájemně stejné chování z hlediska obráběných materiálů mají kotouče K3 a K Ref. až na statisticky významněji odlišnějších středních hodnot u dekoru Black, kdy ale K3 má jakost řezné spáry vyšší.



Obr. 90 Vliv materiálu a použitého pilového kotouče na vlnitost řezné spáry

8.5 Vyhodnocení vlivu použitých technologií z hlediska ekonomie

Následující rozbor jednotlivých technologií z hlediska ekonomie je pouze orientační a víceméně poměrový z důvodu absence informací vztahujících se k referenčnímu kotouči. Rozbor nemůže být objektivní z důvodu nevyhovující kvality řezné spáry při řezání vodním abrazivním paprskem a současně nelze objektivně vyhodnotit trvanlivost ostří jednotlivých kotoučů. Také z důvodu neznámé životnosti kotoučů nelze náklady na pořízení a údržbu rozpočítat na vypovídající hodnoty. Proto jsou následující hodnoty primárně stanoveny úvahou a dále z dostupných informací nabytých ve společnosti Cetecho s.r.o.

Pro ukázku příkladu ceny řezání abrazivním paprskem byl využit ceník společnosti C.Bau spol. s r.o. (2014), viz Příloha 8. Z uvedených kategorií materiálů nejvíce odpovídá hliník a žula, nicméně žula nemá v dané tloušťce umělého kamene (12 mm) cenu uvedenou. Cena řezání desky 3000 × 2000 mm ve kvalitě „dobrá“

(tj. dle ceníku postačující kvalita, vyšší jakost není pro hliník nabízena) je uvedena v Tab. 20, kdy je potřeba zdůraznit, že je pouze orientační a pro přesnou kalkulaci by měla být použita objektivní cenová nabídka společnosti. Současně uvedená cena nemá vysokou výpovědní hodnotu z důvodu nevyhovující kvality řezné spáry při použití této technologie k dělení umělého kamene na čisté rozměry.

Tab. 20 Orientační hrubá kalkulace řezání 1 m umělého kamene pomocí AWJ

Položky ceny		
Kvalita řezu		dobrá
Cena za 1 m rovného řezu	[Kč]	336
Délka řezu	[m]	1
Manipulační časy, kotvení obrobku	[Kč/hod]	360
Příprava výkresů pro řezání	[Kč/hod]	450
Podkladní materiál	[Kč/m^2]	100
Cena za 1 m rovného řezu vč. DPH	**[Kč]**	**1507,66**

Pořizovací cena referenčního kotouče K Ref. společnosti Cetecho s.r.o. byla sdělena mistrem výroby a je pouze orientační. Ostatní ceny kotoučů byly zjištěny z cenových nabídek Mendelovy univerzity v Brně. Ceny jednotlivých broušení se liší z důvodu rozdílných geometrií řezných zubů, kdy vyšší částka byla stanovena na základě reálné ceny broušení referenčního kotouče. Z důvodu speciální geometrie kotouče K3 je tato cena uvedena i pro něj, ostatní kotouče mají uvedenou v závislosti na počtu a druhu zubů, kdy pro trapézové zuby byla určena cena 3 Kč/zub, pro střídavě šikmé zuby 2,50 Kč/zub (bez DPH 21 %). V případě, kdy nebudeme brát v úvahu režijní a mzdové náklady spojené s obráběním, které by byly pro všechny kotouče stejné, vyjdou nám všechny kotouče používané při experimentu levnější než kotouč referenční. Ačkoliv má K3 oproti ostatním vyšší cenu, stále vychází levněji než kotouč referenční.

Tab. 21 Pořizovací náklady včetně nákladů na jedno přebroušení kotouče

		K1	**K2**	**K3**	**K4**	**K Ref.**
Pořizovací cena vč. DPH	[Kč]	2 101	1 377	3 554	2 579	7 000
Cena broušení vč. DPH	[Kč]	392	242	605	163	605
Součet	[Kč]	**2 604**	**1 702**	**4 259**	**2 799**	**7 715**

Ač nejsou uvedené hrubé kalkulace přesné, je zřejmé, že řezání AWJ je mnohem dražší než konvenčními pilovými kotouči. Nezapočítané režijní a mzdové náklady by při řezání 1 m umělého kamene neudělaly v kalkulaci rozhodující položku. Současně je potřeba brát v úvahu základní předpoklad, že řezná spára vzorků dělených abrazivním paprskem zcela nevyhovuje nárokům na kvalitu lepené řezné spáry umělého kamene.

9 DISKUSE

Ze zjištěných výsledků použitých technologií (konvenční dělení formátovací pilou a nekonvenčním vodním abrazivním paprskem) lze jednoznačně říct, že technologie obrábění vodním paprskem s příměsí abraziva je pro dělení umělého kamene na čistý formát bez potřebného následného opracování zcela nevhodná. Zkušební vzorky byly už na dotek hrubé oproti těm řezaným pilovými kotouči, což potvrdilo i následné měření vlnitosti na digitálním mikroskopu. Vodní paprsek při vstupu do materiálu ubírá více materiálu, než následně v samotné řezné spáře, a tato míra narůstá se snižující se rychlostí paprsku. Paradoxně s vyšší mírou úběru materiálu ze vstupní hrany paprsku má snižující rychlost paprsku vliv na vyšší jakost řezné spáry. Je potřeba zmínit, že i přesto je kvalita řezné spáry při této technologii mnohonásobně horší než při dělení pilovými kotouči, a to až s rozdílem 500 μm, což je z hlediska měřené vlnitosti poměrně markantní rozdíl. Ze statistického vyhodnocení lze nicméně říct, že tato technologie není citlivá na složení obráběného umělého kamene, kdy jednotlivé materiály a dekory neovlivňovaly kvalitu řezů. V neposlední řadě je tato technologie mnohem náročnější na finanční prostředky než konvenční obrábění, a nelze proto říci, že by z hlediska obrábění umělého kamene přinášela nové možnosti pro společnosti zabývající se jeho zpracováním.

Z výsledků hloubky vyštípání horní hrany vzorků dělených pilovými kotouči lze vyvodit jisté vlastnosti řezaných materiálů, ačkoliv je potřeba zmínit, že hloubka vyštípání není v případě dělení umělého kamene tolik zásadní pro hodnocení celkové kvality řezné spáry. To je dáno tím, že v případě vyštípaní se lepené desky umělého kamene otočí touto hranou dolů, a ve finálním výrobku s nimi uživatel nepřichází do styku. Z hodnot vyštípání lze usoudit, že čistě bílé dekory (Hi-Macs Ivory White a Corian Designer White) nekladou takový řezný odpor při vstupu nástroje do obrobku. Zato čistě černý dekor Hi-Macs Black je potřeba obrábět opatrněji, protože je náchylnější na vyštípání. Ačkoliv dekor Hi-Macs White Quartz má míru vyštípání srovnatelnou s dekorem Black, jsou obecně černé dekory umělého kamene Solid surface problematičtější na opracování. To je dáno tvorbou bílého prachu, kvůli kterému mohou být při nezkušeném opracování viditelné lepené spáry a současně jsou viditelné případné škrábance na pracovní ploše.

Současně bylo z výsledků zjištěno, že kotouče K1 a K2, a především K1, jsou z naměřených výsledků „citlivější“ na složení materiálu a jejich kladoucímu odporu při vstupu nástroje do obrobku. To se projevilo kolísáním hodnot vyštípání v závislosti na použitém kotouči a druhu řezaného materiálu. Naopak řezy prováděné kotoučemK4 a K3 měly nejmenší míru vyštípání horní hrany materiálu, a ještě zcela nezávisle na děleném materiálu. Nicméně všechny kotouče kromě K1 měly hloubku vyštípání lepší nebo srovnatelnou s kotoučem referenčním, kdežto K1 měl vyštípání téměř 2x tak horší.

Z hlediska rozhodujícího parametru vlnitosti a jeho vlivu na kvalitu řezné spáry bylo zjištěno, že kromě kotouče K3 měly všechny ostatní (K1, K2, K4) kvalitativně horší vliv na řeznou spáru než kotouč referenční. Ač se výsledky kotouče K3 a K Ref. lišily pouze v pár mikrometrech, byl mezi nimi prokázán statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami jejich základních souborů. Z výsledků závislosti jednotlivých kotoučů na vlnitosti dělených materiálů lze z výsledků víceméně usoudit, že kvalita řezu je nezávislá na druhu děleného materiálu, což bylo z převážně většiny až na jisté odchylky prokázáno u kotoučů K1, K2, K3 i K Ref.

Při pohledu na závislost děleného materiálu a velikostmi vlnitosti v porovnání s již zmíněnou hloubkou vyštípání horní hrany lze usoudit, že materiál Black není hůře obrobitelný, pouze má sklon k vyštipování hran při samotném řezání. Zajímavé je, že ačkoliv jsou dekory Black a Ivory White (oba materiál Hi-Macs) ze stejné řady dekorů Solids, a mají tudíž stejnou hustotu, je mezi jejich středními hodnotami základních souborů statisticky významný rozdíl. Nicméně je nutno podotknout, že z hlediska samotných hodnot vlnitosti je tento rozdíl určen doslova mikrometry, což je stále výborná kvalita řezné spáry.

V jednotlivých měřeních nebyl mimo jiné prokázán žádný opakovaný a určující vliv obchodní značky na rozdílné chování materiálu, a to především z hlediska chování nejsrovnatelnějších čistě bílých dekorů (Hi-Macs Ivory White a Corian Designer White).

Z kompletního zhodnocení výsledků pilových kotoučů lze ze všech vyhodnocených parametrů určit, že z hlediska kvality řezu má lepší výsledky než referenční kotouč pouze kotouč K3. Tento kotouč měl výborné výsledky i při měření jeho vibrací, kdy jeho chování ve volném chodu i při daných otáčkách bylo

zcela bezproblémové a jeho rozptyly házivosti nebyly vyšší než 0,07 mm. Naopak nejhorší výsledky v hodnotách vlnitosti řezné spáry měl kotouč K4, který se ovšem během řezání při otáčkách okolo 3080 min^{-1} nacházel v pásmu rezonančních otáček, což mělo za následek velice vysokou boční házivost pilového kotouče. Je potřeba i zmínit poloměr otupení ostří kotoučů měřený před prováděnými řezy, kdy ačkoliv měl kotouč K3 třetí nejvyšší (nicméně stále ve výborném stavu) poloměr otupení, nijak to neovlivnilo výsledné řezné spáry. Nejlepší kvalitou ostří disponoval kotouč K4, jehož negativní vlivy na řez byly už zmíněny, a proto nelze s určitostí říci, jaké by bylo jeho chování v řezné spáře při normálních otáčkách.

10 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo posouzení kvality řezné spáry při dělení rozdílných obchodních značek a jejich dekorů umělého kamene kategorie Solid surface, a to odlišnými metodami obrábění – formátovací pilou a vysokotlakým vodním paprskem s příměsí abraziva.

Základním východiskem pro hodnocená data byl požadavek co nejvyšší jakosti řezné spáry z důvodu lepení pomocí dvousložkového lepidla, které naleptává lepené plochy. Jako základním měřítkem vyhovující kvality spáry sloužily referenční vzorky nařezané pilovým kotoučem společnosti Cetecho s.r.o., která se zpracováním umělého kamene zabývá.

Z hlediska naměřených dat byl vodní paprsek s příměsí abraziva vyhodnocen jako nevhodná technologie pro dělení umělého kamene na čistý rozměr bez potřeby následného opracování. Kromě aspektu nevyhovující kvality je tato technologie také ekonomicky mnohem náročnější v porovnání s konvenčním obráběním pilovými kotouči.

Při obrábění pilovými kotouči byly zkoumány vlivy samotných kotoučů na jakost řezné spáry, stejně jako chování rozdílných materiálů a dekorů při tomto procesu. Výsledky bylo dokázáno, že kvalita řezných spár dělených kotoučem K3 předčila kvalitu spár referenčního kotouče K Ref.

Z výborné kvality řezné spáry a nízkých hodnot vibrací kotouče K3 lze určit jeho geometrii za vhodnou pro dělení umělého kamene. Jedná se o střídavé zešikmení hřbetů zubů, díky čemuž jeden zub slouží k předřezání, a následující k začištění řezu. Zuby mají záporný úhel čela (γ = -5°), který je žádoucí pro obrábění umělého kamene, spolu s lomenou čelní plochou, která je definována úhlem o velikosti 3°. Nízká házivost kotouče je zajištěna speciálními úpravami kotouče, především 11 kompenzačními drážkami a vybroušením disku kotouče.

11 SUMMARY

The main goal of the thesis was to evaluate the kerf quality of different manufacturers and decors of a solid surface with various processing techniques – sizing saw and abrasive water jet.

The primary requirement for evaluation of the collected data was the kerf quality that is desired to be high due to the usage of two-component adhesives that etches bonded surfaces. Reference samples cut by a circular saw blade at the Cetecho Ltd., a solid surface processing company, were used to assess the satisfactory kerf quality.

According to the results, the abrasive water jet appeared to be an unsuitable technology for a clean split of an artificial stone that would need no further processing. Nonetheless, this technology is also economically more demanding in comparison to the conventional circular saw blades machining.

The examination of the circular saw machining included the influence of circular saw blades on the quality of the cut and the behavior of inspected materials and decors. The results determine that the circular saw K3 showed better performance concerning the kerf quality in comparison to the reference circular saw K Ref.

From the excellent kerf quality and low vibration values of circular saw blade K3 can be determined its geometry as appropriate for cutting solid surface. It is discussed about alternative tooth with bevel level of blade back, allowing one tooth to pre-cut and subsequent tooth to finish the kerf. Teeth have a negative rake angle (γ = -5°) which is desirable for cutting solid surface. At the same time the teeth have broken frontal area defined by an angle of 3°. Low runout of the circular saw blade is secured by special vibration damping laser ornaments, especially by eleven compensation grooves and polished disc.

12 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

α	[°]	úhel hřbetu
α	[°]	úhel výstupu paprsku
β	[°]	úhel břitu
γ	[°]	úhel čela
δ	[°]	úhel řezu
λ	[nm]	vlnová délka
λc	[nm]	mezní vlnová délka
λf	[nm]	vlnová délka dlouhovlnného filtru profilu
λs	[nm]	vlnová délka krátkovlnného filtru profilu
π	[-]	matematická konstanta (pí)
ρ	[μm]	poloměr ostří
Y	[-]	rozváděné zuby
∇	[-]	pěchované zuby
2D	[-]	dvourozměrné,
3D	[-]	trojrozměrné
A	[mm]	vzdálenost trysky od materiálu
AFM	[-]	Atomic Force Microscopy
AWJ	[-]	Abrasive Water Jet Machining
Al	[-]	hliník
Al_2O_3	[-]	oxid hlinitý (elektrokorund)
ANSI	[-]	American National Standards Institute
CCD	[-]	Charge-Coupled Device
CNC	[-]	Computer Numeric Control
ČSN	[-]	česká technická norma
D	[mm]	průměr pilového kotouče
D_{min}	[mm]	minimální průměr pilového kotouče
DTD	[-]	dřevotřísková deska
d_m	[mm]	průměr výstupní trysky
d_n	[mm]	průměr vodní trysky
d_p	[mm]	průměr příruby
d_u	[mm]	průměr upínací díry
EN	[-]	evropská norma
f_z	[mm]	posuv na zub

HPL	[-]	High Pressure Laminates
h	[mm]	řezná výška
h	[mm]	výška zubu
h_s	[mm]	vzdálenost stolu od osy hřídele
ISO	[-]	mezinárodní organizace pro normalizaci
k	[-]	počet uzlových průměrů
LED	[-]	Light-Emitting Diode
LSCM	[-]	Laser Scanning Confocal Microscopy
l_n	[mm]	vyhodnocovací délka
l_p	[mm]	základní délka pro primární profil
l_r	[mm]	základní délka pro profil drsnosti
l_w	[mm]	základní délka pro profil vlnitosti
M	[kg/min]	množství abraziva
MDF	[-]	Medium Density Fibreboard
MFM	[-]	Magnetic Force Microscopy
NSF	[-]	National Sanitation Foundation
n	[-]	počet bodů
n	[min^{-1}]	otáčky
n_{max}	[min^{-1}]	maximální otáčky
P	[μm]	parametr vypočítaný ze základního profilu
P_c	[μm]	průměrná výška základního profilu
P_p	[μm]	největší výška výstupku základního profilu
P_t	[μm]	celková výška základního profilu
P_v	[μm]	největší hloubka prohlubně základního profilu
P_z	[μm]	největší výška základního profilu
PES	[-]	polyester
PMMA	[-]	polymethylmetakrylát
PVC	[-]	polyvinychlorid
p	[mm]	přesah pilového kotouče nad obrobkem
p	[MPa]	pracovní tlak vody
p_{min}	[mm]	minimální přesah pilového kotouče nad obrobkem
Q	[l/min]	množství vody
R	[μm]	parametr vypočítaný z profilu drsnosti
R	[mm]	poloměr pilového kotouče

$\mathbf{R_a}$	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
$\mathbf{R_c}$	[μm]	průměrná výška profilu drsnosti
$\mathbf{R_p}$	[μm]	největší výška výstupku profilu drsnosti
$\mathbf{R_t}$	[μm]	celková výška profilu drsnosti
$\mathbf{R_v}$	[μm]	největší hloubka prohlubně profilu drsnosti
$\mathbf{R_z}$	[μm]	největší výška profilu drsnosti
SEM	[-]	Scanning Electron Microscope
SFM	[-]	Scanning Force Microscopy
SiC	[-]	karbid křemíku
SK	[-]	slinuté karbidy
s	[mm]	tloušťka těla pilového kotouče
$\mathbf{s_r}$	[mm]	šířka zubu
$\mathbf{s_1}$	[mm]	vychýlení hrotu zubu vlevo,
$\mathbf{s_2}$	[mm]	vychýlení hrotu zubu vpravo
TEM	[-]	Transmission Electron Microscopy
TSCM	[-]	Tandem Scanning Confocal Microscopy
t	[s]	čas potřebný pro jedno měření
t	[mm]	rozteč zubu
$\mathbf{t_t}$	[s]	čas potřebný pro změnu pozice
UV	[-]	ultrafialové
$\mathbf{v_c}$	$[m \cdot s^{-1}]$	řezná rychlost
$\mathbf{v_f}$	$[m \cdot min^{-1}]$	posuvná (podávací) rychlost
W	[μm]	parametr vypočítaný z profilu vlnitosti
$\mathbf{W_c}$	[μm]	průměrná výška profilu vlnitosti
$\mathbf{W_p}$	[μm]	největší výška výstupku profilu vlnitosti
$\mathbf{W_t}$	[μm]	celková výška profilu vlnitosti
$\mathbf{W_v}$	[μm]	největší hloubka prohlubně profilu vlnitosti
$\mathbf{W_z}$	[μm]	největší výška profilu vlnitosti
WJM	[-]	Water Jet Machining
$\mathbf{x_n, y_n, z_n}$	[-]	kartézské souřadnice
$\mathbf{Z_p}$	[μm]	výška nejvyššího výstupku profilu
$\mathbf{Z_t}$	[μm]	součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu
$\mathbf{Z_v}$	[μm]	hloubka nejnižší prohlubně profilu
z	[-]	počet zubů

13 SEZNAM LITERATURY

1) BARCAL, Jaroslav. Nekonvenční metody obrábění. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989.

2) BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.

3) ČSVTS, Progresivní a nekonvenční technologie obrábění. Praha, 1987.

4) DOSTÁL, František. Drsnost obrobených ploch. 1. vyd. Praha: SNTL, 1962.

5) DUDAREV, Ivan. Hodnocení jakosti povrchu z hlediska funkčních vlastností: osnova závěrečné zprávy projektu č. FSI-J-10-57. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-7204-721-5.

6) FIALA, František a Vlastimil CHRÁST. Strojírenská technologie II. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1983.

7) HOLOPÍREK, Jindřich. *Teorie řezných odporů při obrábění dřeva*. Brno: Vojenská akademie v Brně, katedra ženijních a stavebních strojů, 2000.

8) JANTAČ, Marek. *Dosahovaná přesnost výrobku při řezání vodním paprskem*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 35 s. 5 příloh. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

9) JAVOREK, Ľubomír. *Nástroje*. Vyd. 1. Vo Zvolene: Technická univerzita, 2006. ISBN 978-80-228-1714-1.

10) KARAFIÁTOVÁ, Stanislava a Ivo LANGER. Nekonvenční technologie: [učebnice]. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998. ISBN 80-7200-296-1.

11) KOPECKÝ, Z. -- ROUSEK, M. -- NOVÁK, V. *Hodnocení kvality obrobeného povrchu dřeva pomocí počítačových metod*. In: DZURENDA, L. *Vplyv techniky na kvalitu deleného a obrábaného dreva*. 1. vyd. Vedecká štúdie 2/2008/B. Technická univerzita vo Zvolene: Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2008. s. 55--91. ISBN 978-80-228-1923-7.

12) KUČERA, Pavel. *Hodnocení čelního těsnícího provedení povrchu pomocí charakteristik textury povrchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta

strojního inženýrství, 2008. 58 s.6 příloh, Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.

13) LICHTÁG, Jiří. *Pilový kotouč v procesu podélného rozřezávání dřeva*. Brno: Vysoké učení technické, 1999, 20 s. ISBN 80-214-1554-1.

14) LISIČAN, Jozef. *Teória a technika spracovania dreva*. Vyd. 1. Zvolen: MATCENTRUM, 1996. ISBN 80-967-3156-4.

15) MANDÁT, Dušan. Optické bezkontaktní topografické metody. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3075-1.

16) METELKOVÁ, Jitka. *Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 77 s. 4 příloh. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

17) MORÁVEK, Rudolf. Nekonvenční metody obrábění. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.

18) NUTSCH, Wolfgang. *Příručka pro truhláře*. 2., přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 80-867-0614-1.

19) PROKEŠ, Stanislav. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. 3., nezm. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 584 s.

20) PROKEŠ, Stanislav. *Technologie pro 3. a 4. ročník středních průmyslových škol dřevařských: učební text*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.

21) VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Vyd. 1. Ostrava: Ámos, 2008, 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.

22) VARKOČEK, Jan, Miroslav ROUSEK a Jindřich HOLOPÍREK. *Dělení, obrábění a tváření materiálů*. Vyd. 2. nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2004, 117 s. ISBN 80-7157-759-6. Dostupné také z: http://krameriusndktest.mzk.cz/search/handle/uuid:acd89930-fc56-11e3-89c6-005056827e51.

23) ZÁVACKÝ, Ondřej. *Návrh konstrukčního řešení lehátka a multifunkční lavice z řady exteriérového mobiliáře pro lázeňská a sportovní zařízení podle zadaných návrhů a požadavků*. Brno, 2015. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Eliška Máchová.

INTERNETOVÉ ZDROJE

1) ARISTECH SURFACES LLC. *Safety Data Sheet: Avonite Surfaces Foundations, Acrystone®* [online]. 2014a [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: http://www.avonite.com/wp-content/uploads/Avonite_Surfaces_Studio_Collection.pdf

2) ARISTECH SURFACES LLC. *Safety Data Sheet: Avonite Surfaces Studio Collection* [online]. 2014b [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: http://www.avonite.com/wp-content/uploads/Avonite_Surfaces_Foundations_Acrystone.pdf

3) ARISTECH SURFACES LLC. *Safety Data Sheet: Acrylic Seaming Adhesive* [online]. 2015a [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: http://www.avonite.com/wp-content/uploads/Avonite-Ultra-Bond-GX-SDS-0160411.pdf

4) ARISTECH SURFACES LLC. *TECHNICAL DATA & PERFORMANCE PROPERTIES* [online]. 2015b [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: http://www.avonite.com/wp-content/uploads/Technical_Data_Sheets_US_022015_11x17-1.pdf

5) BUMBÁLEK, Leoš a Bohumil BUMBÁLEK. *Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu. Metrologie měřidel délky* [online]. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2005 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/44_Bumbalek_VUTBR.pdf.

6) C.BAU SPOL S R.O. *Ceník řezání vodním paprskem od 10/2014* [online]. 2015, str. 9 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://www.sps-cl.cz/sites/default/files/materialy/c-bau2015.pdf

7) CETECHO. *Thermoforming: tvarování umělého kamene za tepla*. [online]. 2011 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: http://www.cetecho.cz/umely-kamen-thermoforming

8) DUPONT. *Material Safety Data Sheet: "CORIAN" JOINT ADHESIVE, PART A & PART B* [online]. 2006, 9 s. [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: http://corian.amosdesign.eu/doc/PDF/EN_TECH_CORIAN/COR014_CORIAN_Joint_Adhesive_AandB.pdf

9) DUPONT. *CORIAN® DEEPCOLOR™ TECHNOLOGY* [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.dupont.com/products-and-services/construction-materials/surface-design-materials/brands/corian-solid-surfaces/uses-and-applications/deep-color-technology.html

10) DUPONT. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/DuPont

11) DUPONT COMPANY. *Corian® Solid Surface* [online]. 2009 [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: http://www.hasenkopf.de/sites/default/files/atoms/files/DuPont_Corian_Specdata_English_04-2009_ENG.pdf

12) HI-MACS®. *Fabrication Guidelines* [online]. 2014 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: http://www.himacsuk.co.uk/%2Fmedia%2F21545%2Flg_fabrication_manual_2014.pdf

13) HI-MACS®. *TECHNICAL FACTSHEET: HI-MACS® performance properties* [online]. 2016 [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: http://www.himacs.eu/en/indoor-products

14) MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu?*. 2005, (6), str. 23. Dostupné také z: http://www.mmspektrum.com/clanek/dotykove-nebo-bezdotykove-mereni-struktury-povrchu.html

15) MOSAIC SOLID. *Zbožíznalecké minimum kámen [online]*. 2014, s. 10 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://www.mosaictech.cz/files/zboziznalecke_minumum_kamen.pdf

16) PLÁŠEK, Jaromír. Kon*fokální mikroskop: Renezance experimentálních metod*. Vesmír. 1995, (9). Dostupné také z: http://casopis.vesmir.cz/clanek/konfokalni-mikroskop

17) ŘEŽEME VODOU [online]. 2011 [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: http://www.rezeme-vodou.cz/

18) SEHADOVÁ, Hana. *Fluorescenční a konfokální mikroskopie* [online]. In: České Budějovice: Biologické centrum AVČR, 2011 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: http://alfa.bc.cas.cz/doc/ekotech/study/Fluorescencni-a-konfokalni-mikroskopie.pdf

19) SVOBODA, Jaroslav. *Umělý kámen: Technický (umělý) kámen*. NIS: Nábytkářský informační systém [online]. 2012 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.n-i-s.cz/cz/umely-kamen/page/325/

20) TAYLOR HOBSON. *Form Talysurf Intra: Operator's Handbook*. 2002. Dostupné z: http://www.taylor-hobson.com/

21) ÚSTAV FYZIKY FAST VUT. *AFM mikroskop* [online]. 2010 [cit. 2016-01-21]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/AFM_mikroskopie.pdf

22) ÚSTAV FYZIKY FAST VUT. *Konfokální mikroskop* [online]. 2009 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni_mikroskopie.pdf

23) ÚSTAV HOSPODÁŘSKÉ ÚPRAVY LESA A APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY. *Mikroskop Keyence VHX-5000* [online]. 2013 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: http://uhulag.mendelu.cz/cz/veda/biometricka_laborator/mikroskop-vhx-5000

24) VORBURGER, Ted. *Optical Methods of Surface Measurement*. [online]. 2012 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: http://www.nist.gov/oles/upload/3-Vorburger-Ted-Optical-Methods-of-Surface-Measurement-MSSFAA-10jul12.pdf

25) WIKISKRIPTA. *Konfokální mikroskop* [online]. 2016, 2016-01-07 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Konfok%C3%A1ln%C3%AD_mikroskop

NORMY

1) *ČSN EN ISO 25178-606:2015 – Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 606: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (variace sond).* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. 40 s.

2) *ČSN EN ISO 3274:1998 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů.* Praha: Český normalizační institut, 1999. 20 s.

3) *ČSN EN ISO 4287:1998 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 24 s.

4) *ČSN EN ISO 4288:1998 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 16 s.

5) *ČSN EN ISO 8785:1998 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Nedokonalosti povrchu – Termíny, definice a parametry*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 24 s.

PŘEDNÁŠKY A EXKURZE

1) ANDRÉSEK, Jan. *Přednáška o umělém kameni,2016-01-26*. Střední škola stavebních řemesel Brno-Bosonohy, 2016.

2) ANDRÉSEK, Jan. *Exkurze ve výrobně umělého kamene v rámci předmětu Výroba nedřevěného nábytku (VNN), 2015-11-30*. Sídlo společnosti Cetecho s.r.o., Brno, 2015.

14 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Princip výroby Quartz stone pomocí vibračně-kompresní vakuové technologie 12
http://www.agrostonemalaysia.com/content/img/mftg-process.jpg
Obr. 2 Výrobní linka umělého kamene Hi-Macs® (Závacký, 2015) 14
Obr. 3 Opravení větších vad u Solid surface 15
http://www.cetecho.cz/sites/default/files/O-FIRME/Technologie/kombinace_100_0223.jpg
Obr. 4 Provedení kuchyňské pracovní desky z umělého kamene s těsnící lištou a konstrukčně zpevněnou hranou 15
http://www.cetecho.cz/sites/default/files/PRODUKTY/Kuchyne/pracovni_desky/vzor_provedeni_pracovni_desky_02.jpg
Obr. 5 „Odkapové" drážky (vlevo) a odkládací plocha na horké předměty (vpravo) 20
http://www.cetecho.cz/sites/default/files/PRODUKTY/Fotogalerie-realizaci/PRACOVNI_DESKY_DREZY/100_1578.jpg
http://www.cetecho.cz/sites/default/files/PRODUKTY/Fotogalerie-realizaci/PRACOVNI_DESKY_DREZY/100_1577.jpg
Obr. 6 Postup frézování těsnící lišty kuchyňské pracovní desky (Závacký, 2015) 21
Obr. 7 Ukázka frézování umělého kamene pomocí CNC Cybertronic 21
Obr. 8 Ukázka ručního tvarování umělého kamene 23
Obr. 9 Membránový lis se speciální pecí na prohřátí desky (vlevo) a hydraulický lis (vpravo) 23
http://www.cetecho.cz/sites/default/files/O-FIRME/dilna_-_kopie.jpg
http://www.cetecho.cz/sites/default/files/O-FIRME/Technologie/pec-na-prohrev-materialu.jpg
Obr. 10 Ukázka tvarování Solid surface v membránovém („stolička“) a hydraulickém (umyvadla) lisu 24
Obr. 11 Ukázka dekorů umělého kamene kategorie Solid surface (Corian) 25
http://cdn2.hubspot.net/hub/49178/images/corian-samples.jpg?t=1460832856593&width=450&height=225
Obr. 12 Pracovní deska se dřezem a obkladem z dekoru s translucentní efektem 25
http://www.cetecho.cz/sites/default/files/fotografie/2012/11listopad/img9345.jpg
Obr. 13 Umyvadlové desky s umyvadly z umělého kamene Solid surface..... 26
http://www.cetecho.cz/sites/default/files/PRODUKTY/Koupelny/umyvadlove-desky/umyvadlove_desky_00.jpg
http://www.cetecho.cz/sites/default/files/PRODUKTY/Koupelny/umyvadlove-desky/umyvadlove_desky_00.jpg
Obr. 14 Vana (vlevo) a sprchový kout (vpravo)..... 26
http://www.cetecho.cz/sites/default/files/PRODUKTY/Koupelny/produkty-vany_avonite.jpg
http://www.cetecho.cz/umely-kamen-koupelna-hotel-sax-praha#
Obr. 15 Koupelnový nábytek z umělého kamene..... 27
http://www.cetecho.cz/umely-kamen-himacs-bily-koupelnovy-stojan-na-rucniky#
http://www.cetecho.cz/umely-kamen-koupelnovy-nabytek-aqualight#
Obr. 16 Recepční pulty z umělého kamene 27
http://www.cetecho.cz/realizace-umely-kamen-himacs-recepcni-pult-centrum-cerny-most-praha#
http://www.cetecho.cz/realizace-umely-kamen-himacs-nail-bar-nehtove-studio-centrum-cerny-most-praha#
Obr. 17 Ukázka možností prosvícení (vlevo) a tvarování (vpravo) umělého kamene ... 28
http://www.cetecho.cz/fotogalerie-umely-kamen-barovy-pult-posvicene-logo#
http://www.cetecho.cz/umely-kamen-recepcni-pult-patria-corporate-finance#

Obr. 18 Sedací nábytek na výstavě v Milánu (vlevo) a knihovna (vpravo) z umělého kamene 28
Poskytnuto společností Cetecho s.r.o.
Poskytnuto společností Cetecho s.r.o.
Obr. 19 Prosvětlená police (vlevo) a designová lampa na dálkové ovládání (vpravo) .. 29
Poskytnuto spoelčností Cetecho s.r.o.
http://www.cetecho.cz/designova-stojaci-lampa-umely-kamen-dalkove-ovladani#
Obr. 20 Charakteristika pilového kotouče (Javorek, 2006) 31
Obr. 21 Druhy zubů jednodílných pilových kotoučů (Javorek, 2006) 32
Obr. 22 Druhy zubů pájených pilových kotoučů (Javorek, 2006) 33
Obr. 23 Dělení podle tvaru pilového kotouče (Prokeš, 1984) 34
Obr. 24 Úprava řezného zubu (Javorek, 2006) 35
Obr. 25 Geometrie řezného zubu 36
http://www.rzk.xf.cz/zdroje/reznyuhly-m.gif
Obr. 26 Ukázka odhlučňovacích drážek na pilovém kotouči CMT 39
http://www.igm.cz/images/produkty/pilove-kotouce/cmt/cmt-pilove-kotouce-na-nezelezne-kovy-a-plasty.jpg
Obr. 27 Ukázka měděných nýtů na pilovém kotouči AKE 39
http://www.cuttingedgesaws.com.au/persistent/catalogue_images/categories/image_AKEPanel Saw.jpg
Obr. 28 Kinematika řezání rostlého dřeva pilovým kotoučem (Kopecký et al., 2008) .. 41
Obr. 29 Proces otupování břitu (Varkoček et al., 2004) 45
Obr. 30 Schéma řezání čistým vysokotlakým vodním paprskem 50
http://www.bystronic.cz/com-media/img/products/Waterjet/Reinwasserschneiden_csy.png
Obr. 31 Schéma řezání vysokotlakým vodním paprskem s příměsí abraziva 51
http://www.bystronic.cz/com-media/img/products/Waterjet/abrasiv_csy.png
Obr. 32 Zóny obrobeného povrchu (Barcal, 1989; Valíček a Hloch, 2008) 52
Obr. 33 Profil povrchu – drsnost (a), vlnitost (b), tvar (c) (Kučera, 2008; Hlásková, 2011) 55
Obr. 34 Profil povrchu (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999) 56
Obr. 35 Výškové parametry profilu povrchu (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999) 58
Obr. 36 Průměrná výška prvků profilu (ČSN EN ISO 4287:1998, 1999) 58
Obr. 37 Princip konoskopie (Mandát, 2012) 62
Obr. 38 Princip profilovacího měření (Mandát, 2012) 63
Obr. 39 Příklad interferogramů pro různé výškové hladiny měření (Vorburger, 2012) . 64
Obr. 40 Princip stereoskopické metody (Mandát, 2012) 64
Obr. 41 Geometrie Fourierovské profilometrie (Mandát, 2012) 65
Obr. 42 Princip konfokálního mikroskopu 66
http://www.wikiskripta.eu/images/thumb/f/f9/Konfok%C3%A1lni_mikroskop.png/264px-Konfok%C3%A1lni_mikroskop.png
Obr. 43 Schéma Focus variation mikroskopu (ČSN EN ISO 25178-606:2015, 2016) .. 68
Obr. 44 Barevné zobrazení hodnoceného povrchu 68
Obr. 45 Moiré metody (Mandát, 2012) 69
Obr. 46 Princip dotykového profilometru (Valíček a Hloch, 2008) 70
Obr. 47 Nákres snímaného profilu (Metelková, 2014) 71

Obr. 48 Vliv mechanického filtrování na měřenou drsnost (a) a vliv parametru šikmosti na dráhu snímacího hrotu (b) (Taylor Hobson, 2002) 71
Obr. 49 Pákový model funkce snímačů drsnosti povrchu generátorového (a) a impedančního (b) typu (Bumbálek et al., 1989) 72
Obr. 50 Elektromagnetický (a) a elektrodynamický (b) snímač (Bumbálek et al., 1989) 73
Obr. 51 Schéma piezoelektrického snímače (Bumbálek et al., 1989) 73
Obr. 52 Schéma elektroinduktivního snímače (a) a elektroinduktivního snímače s pohyblivým feromagnetickým jádrem (b) (Bumbálek et al., 1989) 74
Obr. 53 Schéma elektrokapacitního snímače (Bumbálek et al., 1989) 75
Obr. 54 Princip SEM a TEM 76
http://www.fzu.cz/sites/default/files/imagecache/pulka_strany/images/popularizace/em3.png
Obr. 55 Princip AFM 77
http://www.wikiskripta.eu/images/0/03/AFM.png
Obr. 56 Vybrané dekory 80
http://eidupont.scene7.com/is/image/eidupont/Corian_Designer_White_690x345?id=zdfR12&wid=690&hei=345&fmt=jpg
http://www.himacs.eu/sites/himacs/files/styles/product_zoom/public/products/outdoor/hi-macs_s29_ivory_white_rgb.jpg?itok=uN-VhLc1
http://www.himacs.eu/sites/himacs/files/styles/product_zoom/public/products/indoor/hi-macs_s22_black_rgb.jpg?itok=b-KnQZNx
http://www.himacs.eu/sites/himacs/files/styles/product_zoom/public/products/outdoor/hi-macs_g04_white_quartz_rgb.jpg?itok=w9I8IauS
Obr. 57 Formátovací pila SCM Si 6n 3200 80
Obr. 58 Formátovací pila ROJEK PF 300L 81
Obr. 59 Microstep Aquacut 1501.20W (Jantač, 2014) 82
Obr. 60 Přístroj KINEX, vlevo snímací hrot s ukazatelem hodnot 82
Obr. 61 Zkušební stend (vlevo) a snímač vibrací EPRO (vpravo) 83
Obr. 62 Měřicí systém LabVIEW (vlevo) a graf házivosti zpracovaný v softwaru SignalExpress (vpravo) 83
Obr. 63 Vyhodnocování nasnímaného povrchu (vlevo) a měření poloměru otupení ostří (vpravo) na mikroskopu VHX-5000 84
Obr. 64 Difúzní adaptér pro rozptyl světla (OP-87299 SHORT) 84
Obr. 65 Hloubka vyštípání horní hrany materiálu Hi-Macs Black děleným pilovým kotoučem firmy Cetecho s.r.o. (K Ref.) 86
Obr. 66 Vlnitost materiál Hi-Macs White Quartz děleným kotouče K3 86
Obr. 67 Míra zaoblení horní hrany materiálu Hi-Macs Ivory White děleným AWJ 87
Obr. 68 Celkový tvar profilu materiálu Corian Designer White děleným AWJ 87
Obr. 69 Kotouče K1, K2, K3 a K4 88
Obr. 70 Pilový kotouč K1 – zuby a úpravy těla kotouče 89
Obr. 71 Pilový kotouč K2 – zuby a úpravy těla kotouče 90
Obr. 72 Pilový kotouč K3 – zuby a úpravy těla kotouče 91
Obr. 73 Pilový kotouč K4 – zuby a úpravy těla kotouče 91
Obr. 74 Přehled vibrací [mm] jednotlivých kotoučů při rozdílných měřeních 92
Obr. 75 Statická házivost a vibrace při daných otáčkách kotouče K1 93
Obr. 76 Statická házivost a vibrace při daných otáčkách kotouče K2 93

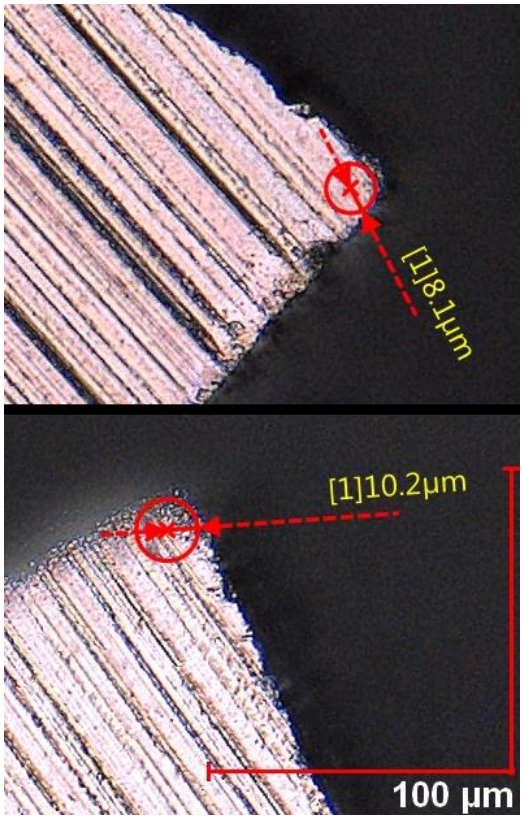
Obr. 77 Statická házivost a vibrace při daných otáčkách kotouče K3 94
Obr. 78 Statická házivost a vibrace při daných otáčkách (rezonanční otáčky) kotouče K4 94
Obr. 79 Vibrace při daných otáčkách kotouče K4 94
Obr. 80 Ukázka řezných spár vzorků dělených abrazivním vodním paprskem 95
Obr. 81 3D zobrazení řezné spáry materiálu Hi-Macs Black řezaným AWJ 100 96
Obr. 82 Vliv materiálu a rychlosti vodního paprsku na hloubku úběru materiálu horní hrany materiálu 96
Obr. 83 Vliv technologie dělení na vlnitost řezné spáry 97
Obr. 84 Vliv rychlosti abrazivního vodního paprsku na vlnitost řezné spáry 98
Obr. 85 Vliv pilového kotouče na hloubku vyštípání horní hrany materiálu 99
Obr. 86 Vliv materiálu na hloubku vyštípání horní hrany 99
Obr. 87 Vliv materiálu a použitého pilového kotouče na hloubku vyštípání horní hrany materiálu 100
Obr. 88 Vliv pilového kotouče na vlnitost řezné spáry 101
Obr. 89 Vliv materiálu na vlnitost řezné spáry 101
Obr. 90 Vliv materiálu a použitého pilového kotouče na vlnitost řezné spáry 102

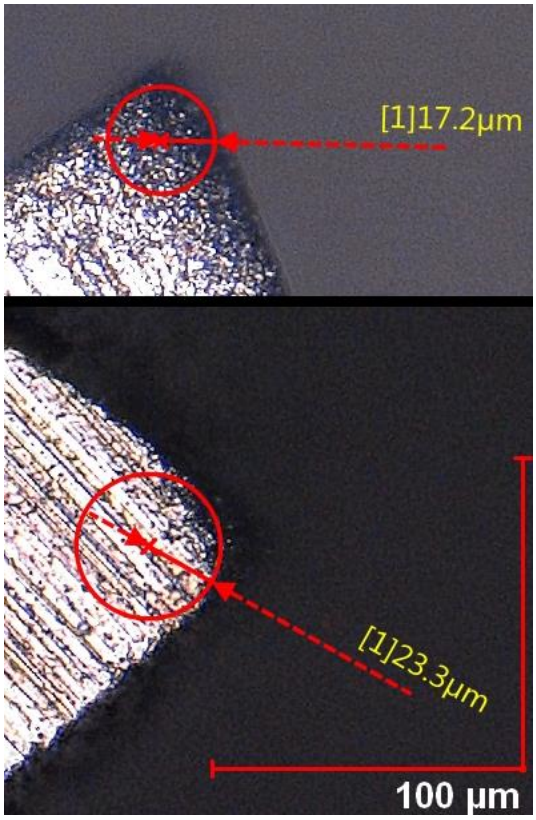
15 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání vlastností materiálů používaných na pracovní desky (Umělý kámen.cz, 2011) 10
Tab. 2 Srovnání fyzikálních vlastností Solid surface, Quartz surface a přírodního kamene (Mosaic Solid, 2014) 11
Tab. 3 Dodávané formáty materiálu Corian (DuPont Company, 2009) 16
Tab. 4 Přehled vlastností materiálu Corian v tloušťce 6 a 12 mm (DuPont Company, 2009) 17
Tab. 5 Dodávané formáty materiálu Hi-Macs (Hi-Macs®, 2016) 18
Tab. 6 Přehled vlastností materiálu Hi-Macs v dekorové řadě Solids (plné barvy) a Granite (s větším zrnem) (Hi-Macs®, 2014) 18
Tab. 7 Dodávané formáty materiálu Avonite (Aristech Surfaces LLC, 2015b) 19
Tab. 8 Rozdělení obrábění (Varkoček et al., 2004) 30
Tab. 9 Přesah pilového kotouče nad obrobkem *p* v závislosti na průměru pilového kotouče *D* (Prokeš, 1984) 43
Tab. 10 Srovnání kontaktních a bezkontaktních metod (Metelková, 2014) 60
Tab. 11 Přehled parametrů vybraných pilových kotoučů 89
Tab. 12 Statická házivost a vibrace kotouče K1 93
Tab. 13 Statická házivost a vibrace kotouče K2 93
Tab. 14 Statická házivost a vibrace kotouče K3 93
Tab. 15 Statická házivost a vibrace kotouče K4 94
Tab. 16 Střední hodnoty hloubky úběru materiálu horní hrany vzorku při řezání AWJ 95
Tab. 17 Střední hodnoty vlnitosti materiálů při řezání AWJ 97
Tab. 18 Střední hodnoty hloubky vyštípání horní hrany při řezání pilovými kotouči 99
Tab. 19 Střední hodnoty vlnitosti materiálů při řezání pilovými kotouči 101
Tab. 20 Orientační hrubá kalkulace řezání 1 m umělého kamene pomocí abrazivního vodního paprsku 103
Tab. 21 Pořizovací náklady včetně nákladů na jedno přebroušení kotouče 103

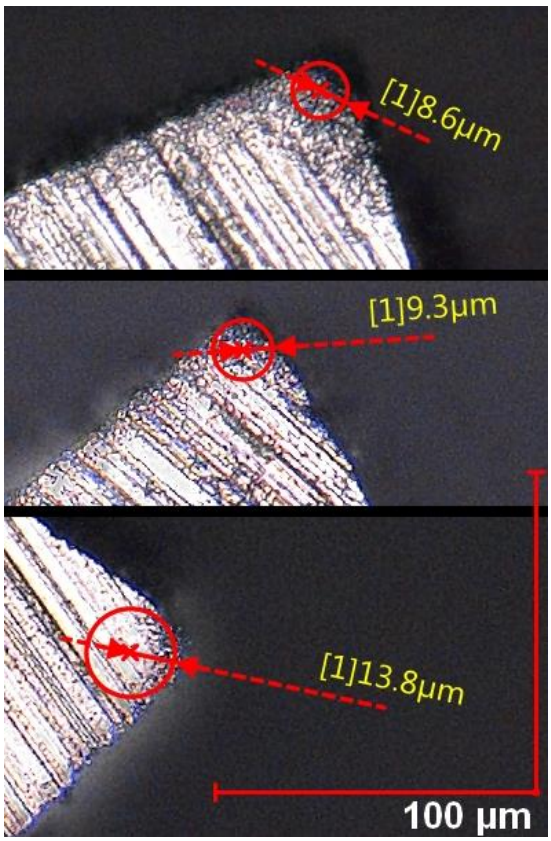
16 PŘÍLOHY

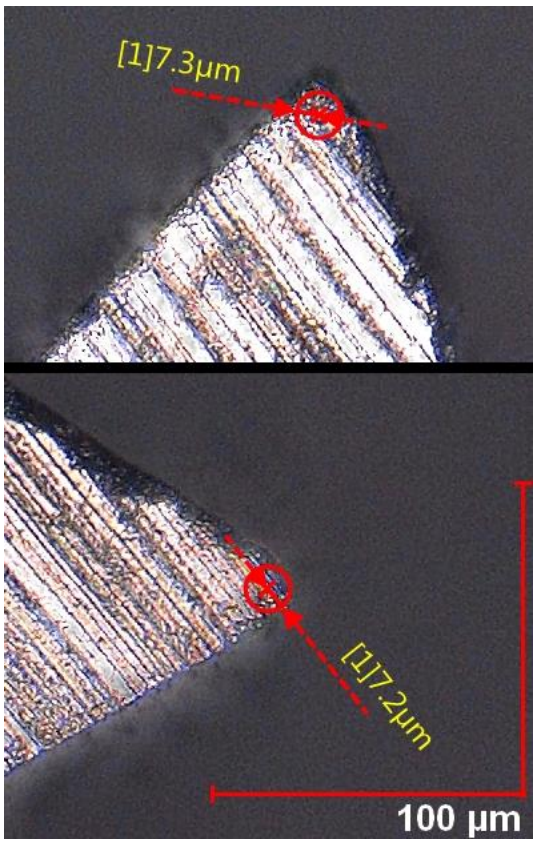
Příloha 1 Poloměry otupení ostří K1 (vlevo) a K2 (vpravo)



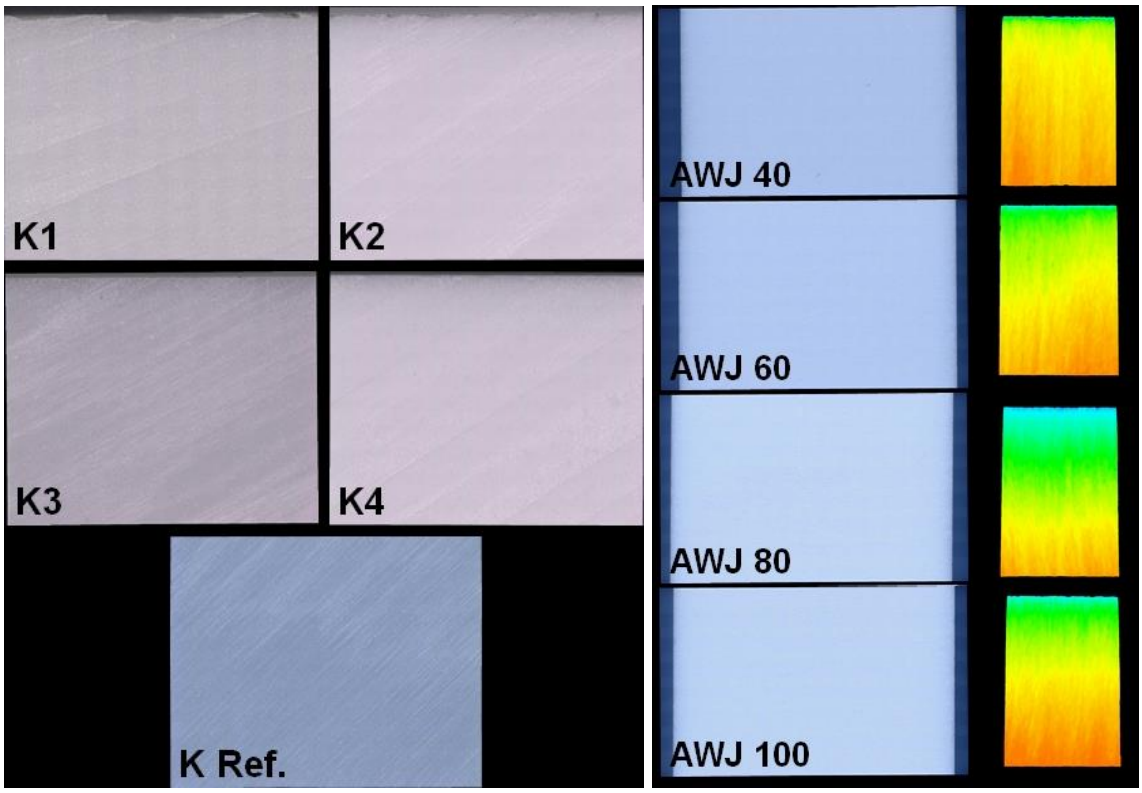


Příloha 2 Poloměry otupení ostří K3 (vlevo) a K4 (vpravo)

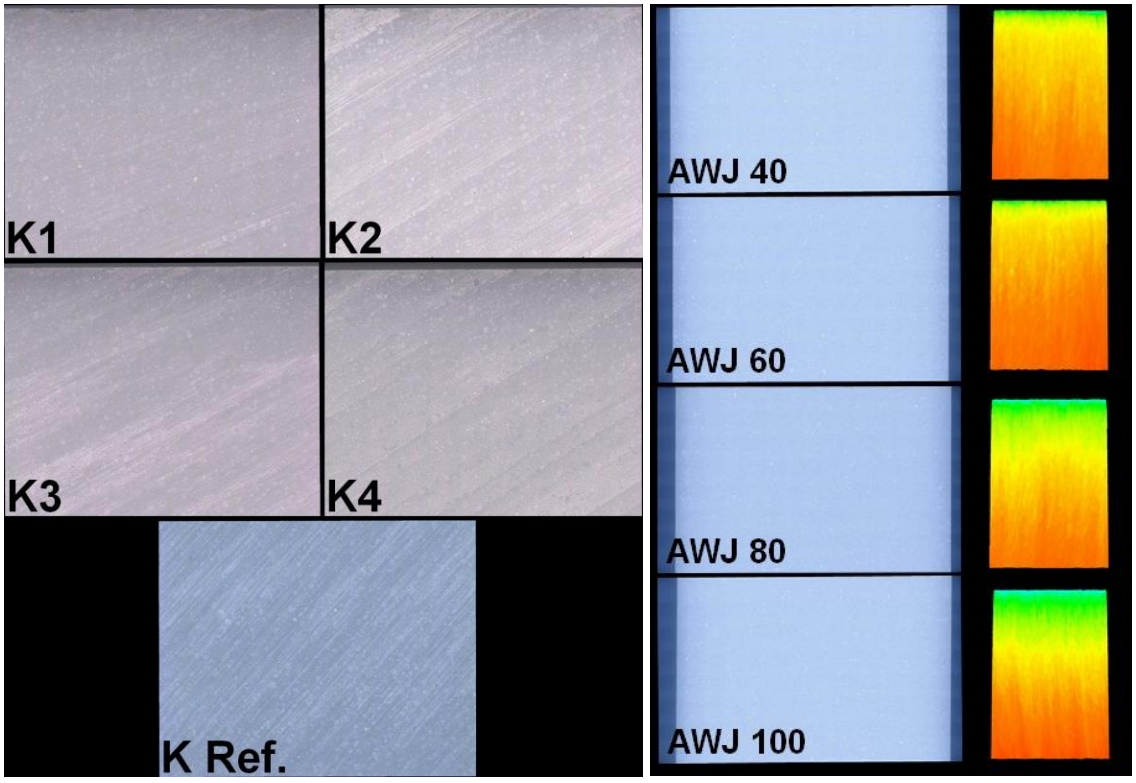




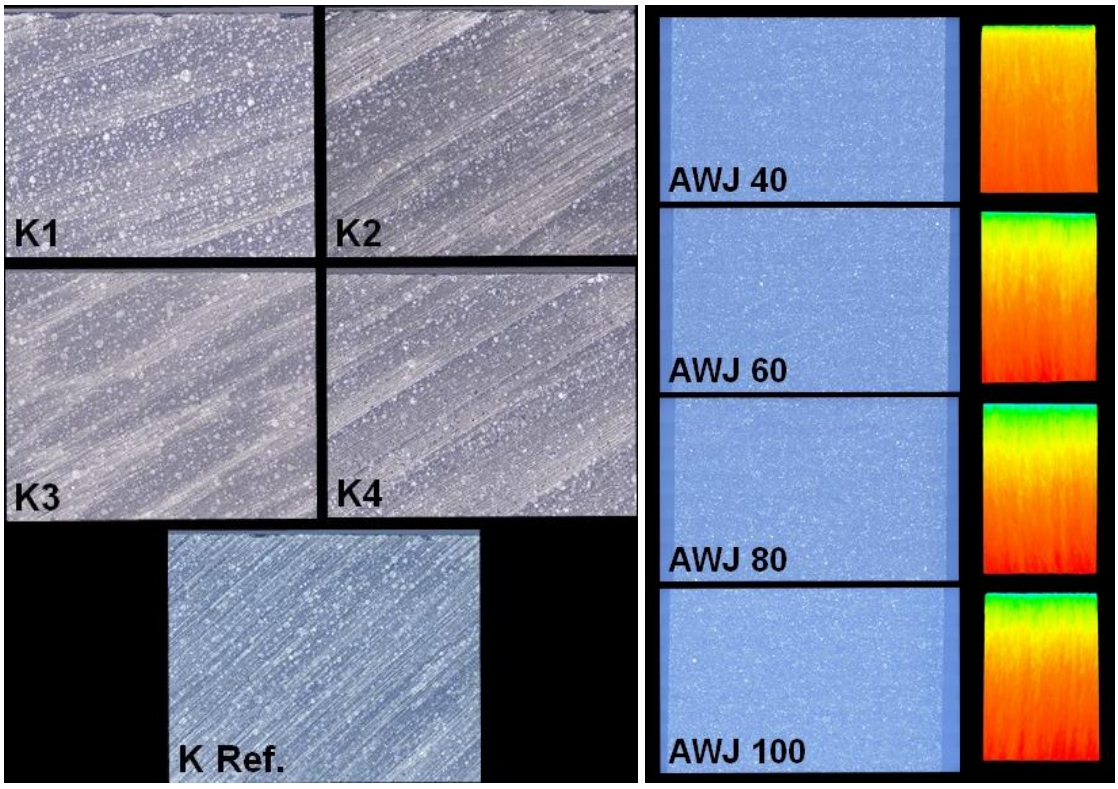
Příloha 3 Corian Designer White – ukázky nasnímaných vzorků řezaných pilovými kotouči (vlevo) a abrazivním vodním paprskem (vpravo)



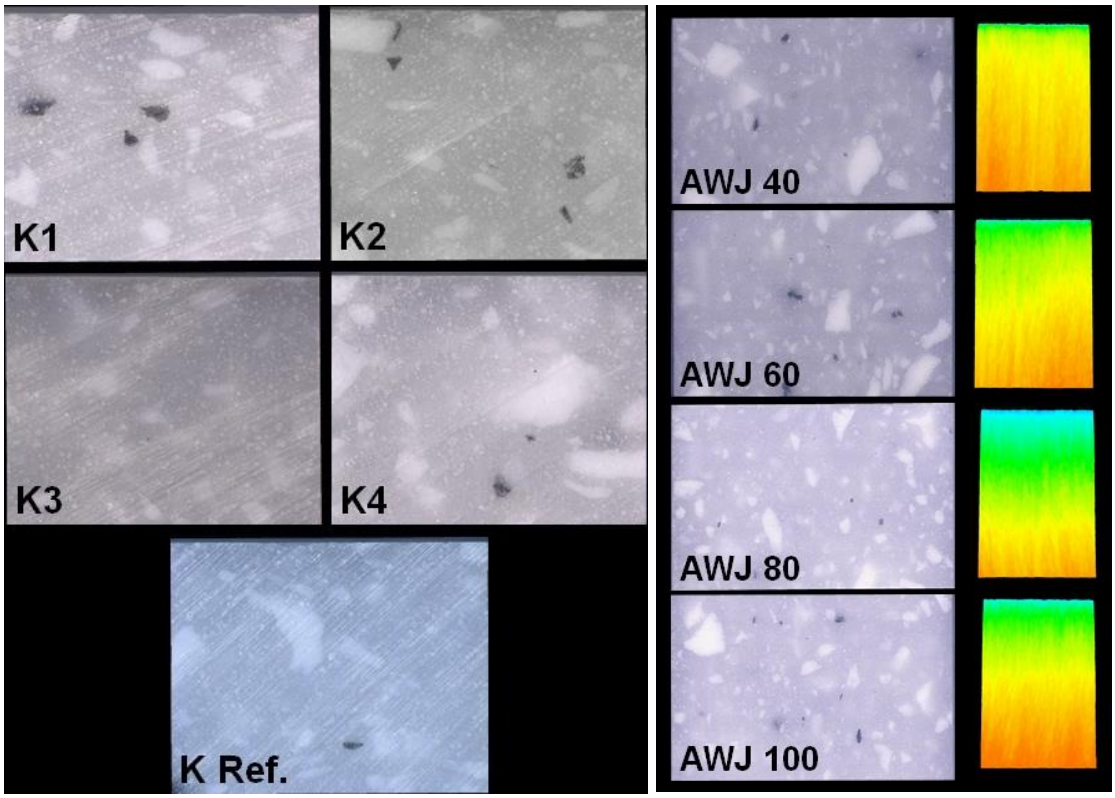
Příloha 4 Hi-Macs Ivory White – ukázky nasnímaných vzorků řezaných pilovými kotouči (vlevo) a abrazivním vodním paprskem (vpravo)



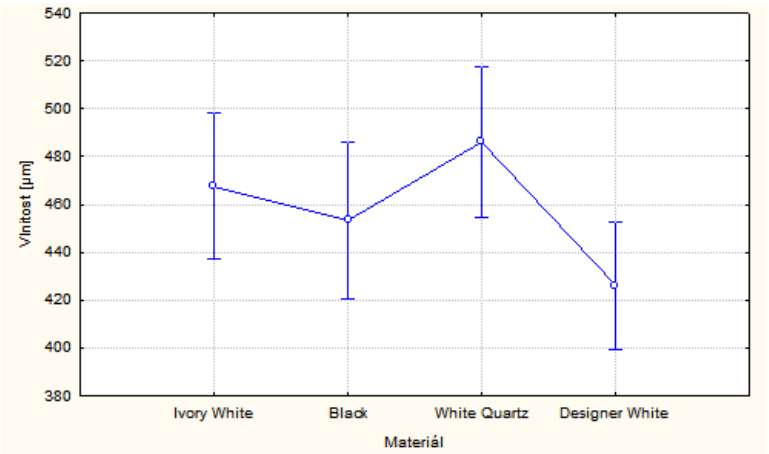
Příloha 5 Hi-Macs Black – ukázky nasnímaných vzorků řezaných pilovými kotouči (vlevo) a abrazivním vodním paprskem (vpravo)



Příloha 6 Hi-Macs White Quartz – ukázky nasnímaných vzorků řezaných pilovými kotouči (vlevo) a abrazivním vodním paprskem (vpravo)



Příloha 7 Vliv materiálu na vlnitost řezné spáry dělené vodním paprskem včetně Scheffého testu mnohonásobného porovnání



Cell No.	Materiál	{1} 461,60	{2} 453,60	{3} 474,53	{4} 426,22
1	Ivory White		0,986034	0,940304	0,355827
2	Black	0,986034		0,819191	0,622667
3	White Quartz	0,940304	0,819191		0,142880
4	Designer White	0,355827	0,622667	0,142880	

Příloha 8 Ceník řezání vodním paprskem společnosti C.Bau spol. s r.o. (2014)

Ceník řezání vodním paprskem od 10/2014

Orientační cena v Kč bez DPH za 1m rovného řezu v dané kvalitě (kvalita, dobrý, dostatečný, dělicí) při použití abraziva Garnet #80 pro daný materiál (obrobitelnost). Pro aktuální cenu si vyžádejte kalkulaci !

tl. Mater.	Ocel,nerez (3,25)		Hliník (8,45)		Žula (11,37)			Sklo (16,54)				PVC (36,20)	Dřevo borovice (72,00)
(mm)	dobrý	dělicí	dobrý	dělicí	kvalita	dobrý	dělicí	kvalita	dobrý	dost.	dělicí	dobrý	dobrý
1,5	165	84	64	33									
2	206	105	80	41									
3	273	139	106	54									
4	327	166	126	65				135	65	45	34		
5	371	189	143	73								34	18
6	417	210	161	81				177	83	54	42		
8	561	269	216	104				211	111	72	54		
10	714	343	275	133	389	205	99	268	141	92	68	65	33
12	871	419	336	162				327	172	112	83		
16	1 204	579	464	223				451	237	154	114		
20	1 561	751	601	289	850	447	215	585	307	200	148	141	71
25	2 047	985	788	380				767	403	262	194		
30	2 527	1 274	972	491	1 548	723	365	1 064	497	326	251	228	115
40	3 760	1 897	1 447	730	2 300	1 075	543	1 582	739	484	374	338	171
50	5 317	2 684	2 044	1 033	3 250	1 519	768					478	241

Legenda kvality řezu:
Kvalita řezu vychází z předpokladu, že maximální rychlost řezu je stav, kdy paprsek přesně dělí materiál. Čím je rychlost řezu nižší, tím je vyšší kvalita řezu. 20% maximální rychlosti je potom kvalitní řez. U silných materiálů kvalita řezu klesá směrem k výstupní ploše. Nejkvalitnější je místo vstupu paprsku do materiálu. Čas potřebný pro řezání materiálu závisí na výkresu, čím více křivek a jednotlivých úseček, tím bude čas řezání delší. Proto si vyžádejte vždy skutečnou kalkulaci ceny řezání dle výkresu. Výkresy můžete připravit nejlépe ve formátu .DXF, .DWG. Pro řezy ve 3D se informujte o možnostech stroje a možných výrobních postupech. Ostatní formáty po dohodě.

kvalita	Kvalitní řez - jemná řezná plocha
dobrý	Dobrý řez - většinou postačující kvalita
dost.	Dostatečný řez - jemnější spodní strana
dělicí	Dělicí řez - hrubá spodní strana

Řezací stroj je portálové konstrukce s řezací hlavou 3D a s pracovním stolem 2 x 4m. Pro řezy ve 3D je pracovní prostor užší vlivem bezpečnostních zón od okrajů vany.

Další položky ceny:		
Manipulační časy, kotvení obrobku	360	Kč/hod
Příprava výkresů pro řezání	450	Kč/hod
Podkladní materiál, sklo, plexi, kámen a.j.	100	Kč/m2
Předvrtání otvorů – křehké mat. - sklo, žula	1	Kč/1s vrtání
Složité řezy ve 3D	Cena dle složitosti řezu.	