

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ  
KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ PRO AUTOMOBILY

**NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ**

**UNCONVENTIONAL MACHINING METHODS**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

AUTOR PRÁCE:

PETR CHALUPA

VEDOUCÍ PRÁCE:

Ing. RADIM TROJAN, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství  
Katedra materiálů a technologií pro automobily

## Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Chalupa**

Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma: **Nekonvenční metody obrábění**  
**Unconventional machining methods**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky frézování
2. Možnosti technologie nekonvenčního obrábění v závislosti na velikosti dílů a technologii výroby
3. Vlastnosti povrchů dokončené nekonvenční technologií
4. Možnosti využití technologií nekonvenčního obrábění
5. Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KUNSTFELD, Jaroslav. Porovnání životností fréz upnutých v termoupínacích oproti jiným způsobům upínání nástrojů: Comparison of the clamping of milling cutters in thermal fixtures with other tool clamping methods : autoreferát disertační práce. Ostrava: VŠB – Technická
- [2] KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2011. Sv. první. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [3] SADÍLEK, Marek. Nekonvenční metody obrábění I. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [4] ALTINTAS, Yusuf. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 0-521-65973-6.
- [5] VLACH, B., aj. Technologie obrábění a montáží. 1. vyd. Praha: SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1990. 464 s. ISBN 80-03-00143-9.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Radim Trojan, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



---

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.  
vedoucí katedry



---

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování bakalářské práce

## I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání bakalářské práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah BP                  |
| 2. Originál zadání BP                        | 7. Textová část BP           |
| 3. Zásady pro vypracování BP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

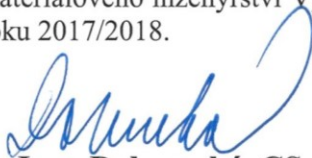
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě.....

.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá tématem nekonvenční metody obrábění. V práci jsou přiblíženy obecné základy technologie frézování a dále je zpracováno obecné zasvěcení do problematiky vybraných technologií – válečkování, mikrokování za studena a ultrazvukového obrábění. V závěru práce je vypracován návrh na snížení drsnosti vnitřních, vnějších a tvarových ploch rámečku světlometu.

## **Klíčová slova**

Technologie frézování, nekonvenční metody obrábění, válečkování, mikrokování za studena, ultrazvuk, drsnost povrchu, řezání.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the topic of unconventional method of machining. The general principles of milling technology are approachd and the general introduction to the problems of selected technologies - rollering, cold micro-curing and ultrasonic machining is elaborated. At the end of the thesis a proposal is made to reduce the roughness of the interior, exterior and shaped surfaces of the headlight frame.

## **Key words**

Milling technology, unconventional machining, roller, ultrasound, cold forging, surface roughness, cutting.

## **Poděkování**

Tímto způsobem bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Radimu Trojanovi, Ph.D. za ochotu poskytovat mi své cenné rady a postřehy, a také velkou trpělivost po celou dobu tvorby mé práce. Rovněž nesmím opomenout mou rodinu, která mi vždy byla oporou po celou dobu studia.



# Obsah

Úvod.....	11
1 Úvod do problematiky frézování.....	12
1.1 Kinematika frézovacích procesů .....	13
1.2 Frézovací nástroje.....	15
1.2.1 Nástrojové materiály .....	17
1.3 Frézovací stroje.....	18
1.3.1 Konzolové frézky .....	18
1.3.2 Rovinné frézky .....	20
1.3.3 Speciální frézky.....	21
1.4 Řezné podmínky .....	22
1.4.1 Vztahy pro výpočet řezných podmínek:.....	23
2 Možnosti technologie nekonvenčního obrábění v závislosti na velikosti dílů a technologii výroby.....	24
2.1 Válečkování.....	24
2.1.1 Obecná charakteristika technologie.....	24
2.1.2 Princip metody .....	25
2.2 Ultrazvukové obrábění .....	27
2.2.1 Princip metody .....	27
2.2.2 Ultrazvukové obrábění bez využití brusné kaše.....	29
3 Vlastnosti povrchů dokončené nekonvenční technologií.....	38
3.1 Vlastnosti povrchů dokončené válečkovou technologií .....	38
3.1.1 Zpevnění povrchové vrstvy materiálu.....	38
3.1.2 Vyhlazování obrobených povrchů válečkováním .....	39
3.1.3 Mikrokování za studena (cold forging).....	42
4 Možnosti využití technologie nekonvenčního obrábění.....	46
4.1 Nástroje s diamantovým hrotem.....	46
4.2 Návrh snížení drsností ploch světlometu SCX.....	49

4.2.1	Možnosti využití válečkových nástrojů s diamantovým hrotem .....	51
4.2.2	Možnosti využití válečkování .....	52
4.2.3	Možnosti FORGE fix®P .....	53
5	Zhodnocení a závěr .....	55
	Seznam použité literatury .....	56
	Seznam obrázků .....	57

## Úvod

Téma nekonvenční metody obrábění je velice široká oblast, obsahující velké množství technologií založených na různých fyzikálních principech, a která i přes svůj neustálý vývoj má své pevné místo v průmyslu. Metody bývají vhodnou technologickou variantou u materiálů, které jsou běžnými konvenčními metodami neobrobitelné.

Pojem obrábění lze definovat jako technologický proces, který umožňuje upravovat dané povrchy do požadovaných rozměrů, tvarů a jakosti odebráním materiálu mechanickými, elektrickými, chemickými aj. pochody. Součásti, které podléhají procesu obrábění, obecně nazýváme obrobek.

Prapočátky technologie obrábění se datují až do doby před dvěma miliony let, kdy byly vyrobeny první primitivní nástroje člověkem zručným (*homo habilis*), a které byly postupně zdokonaleny *homo sapiens*. Mezi tyto nástroje patřily pěstní klíny, hroty, drásadla, aj.

Jako startovní čáru moderních obráběcích procesů lze označit začátek 18. století, kdy byl zahájen systematický vývoj obráběcích strojů. Potřeba modernizace byla důsledkem neustále vyšších požadavků na přesnost práce, jakost obrobených povrchů, ale i požadavky na navýšení počtu vyrobených součástí. Zmíněné rostoucí požadavky a možnosti vedly logicky i k vývoji nových obráběcích technologií (frézování, vyvrtávání, výroba ozubených kol atd.) a samozřejmě i k vývoji automaticky pracujících obráběcích strojů.

Cílem mé bakalářské práce je přiblížit čtenáři úvod do problematiky frézování a blíže seznámit s dokončovacími technologiemi pro povrchy, jako jsou např. válečkování, mikrokování za studena a ultrazvukové obrábění. Vybrané dokončovací metody budou v závěrečné části práce navrženy pro úpravu povrchu ploch světlometu, jehož návrh a vývoj byl realizován firmou Varroc Lighting Systems, s.r.o., která se zabývá vývojem světlometů. Dané světlometry byly vyhotoveny pro sportovní automobil SCX.

# 1 Úvod do problematiky frézování

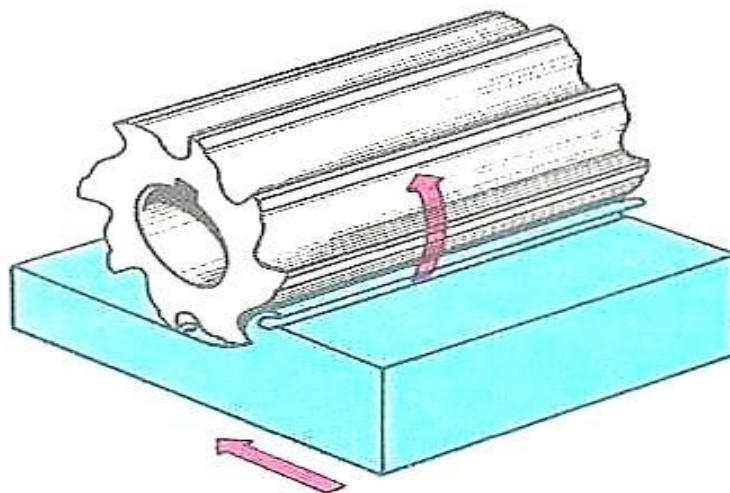
Pojem frézování lze definovat jako obráběcí metodu, při níž dochází k odebrání materiálu z obrobku pomocí břitů rotujícího nástroje. [1] Jedná se o metodu, která je mladším způsobem obrábění ve srovnání se soustružením. Prvotní jednoduché stroje na frézování (frézky) byly vytvořeny na počátku 18. století, přičemž podoba, která se již dala porovnat s dnešními, dostaly teprve koncem 19. století.

V průběhu vývoje se z frézek staly velice výkonné stroje a po soustruhu jsou druhým nejrozsáhlejšími nástroji v průmyslu. Bývá obvyklé, že obrobek je posouván v kolmém směru vzhledem k ose obráběcího stroje. Ovšem neustálý vývoj frézovacích strojů již umožňuje v dnešní době plynule měnit posuvný pohyb, který lze realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces bývá přerušovaný. Jednotlivé zuby frézy odřezávají krátké třísky různých průřezů. Touto technologií lze obrábět plochy rovinné, tvarové, vnější či vnitřní.

Existují dva základní způsoby frézování, které se rozdělují dle různého způsobu záběru fréz do materiálu - **čelní** a **válcové**. [2]

## Válcové frézování:

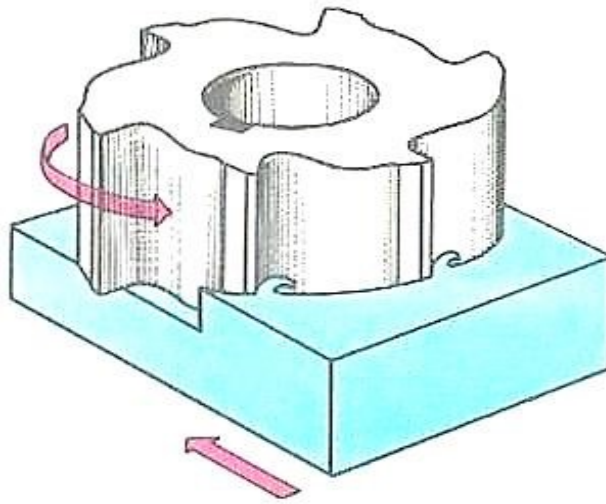
Jak je zřejmé z Obr. 1, válcovací frézy (nástroje) mají břity vytvořeny na obvodech. Hloubka odebíraného materiálu je nastavována kolmo vzhledem k ose frézy a směru posuvu. Frézování bývají menší plochy, než je řezná délka nástroje. [2]



Obr. 1 Schématické znázornění frézování obvodem válcové frézy [3]

## Čelní frézování:

K frézování dochází čelními frézami, na kterých jsou umístěny břity jak na čele, tak i na obvodech. Nástroj bývá rovnoměrně zatížen, díky čemuž je nejen možné dosáhnout vyššího řezného výkonu, ale také plochy obrobene touto technologií se vyznačují lepší jakostí. Zmíněná fakta jsou jasnou indicií, že čelní frézování bývá častější variantou. Schématický náčrt procesu je zobrazen na Obr. 2. [2]



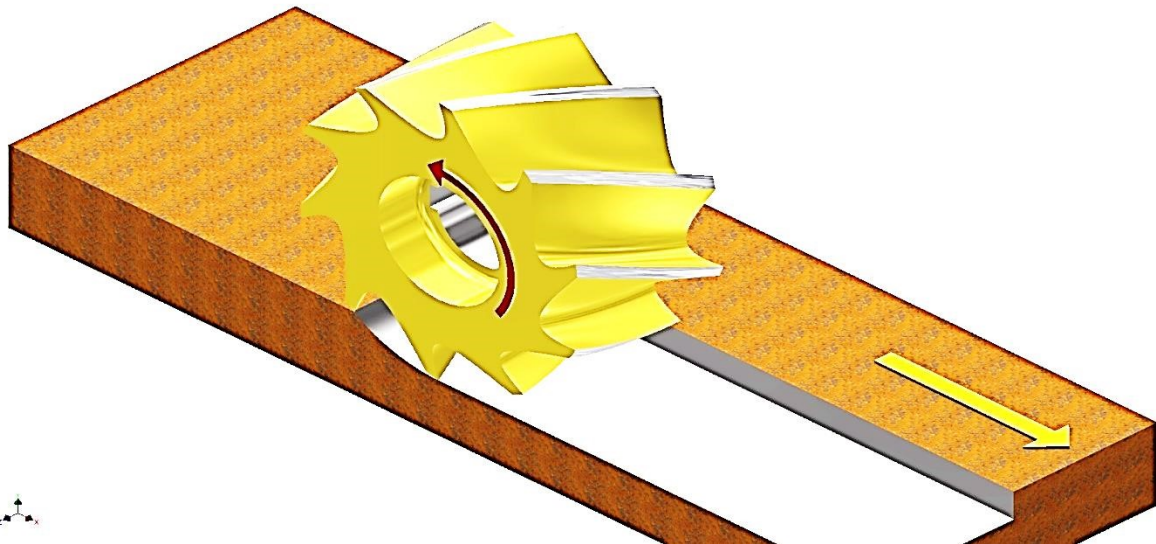
Obr. 2 Schématické znázornění frézování čelem čelní frézy [3]

### 1.1 Kinematika frézovacích procesů

Dle kinematiky frézovacích procesů odlišujeme dva způsoby:

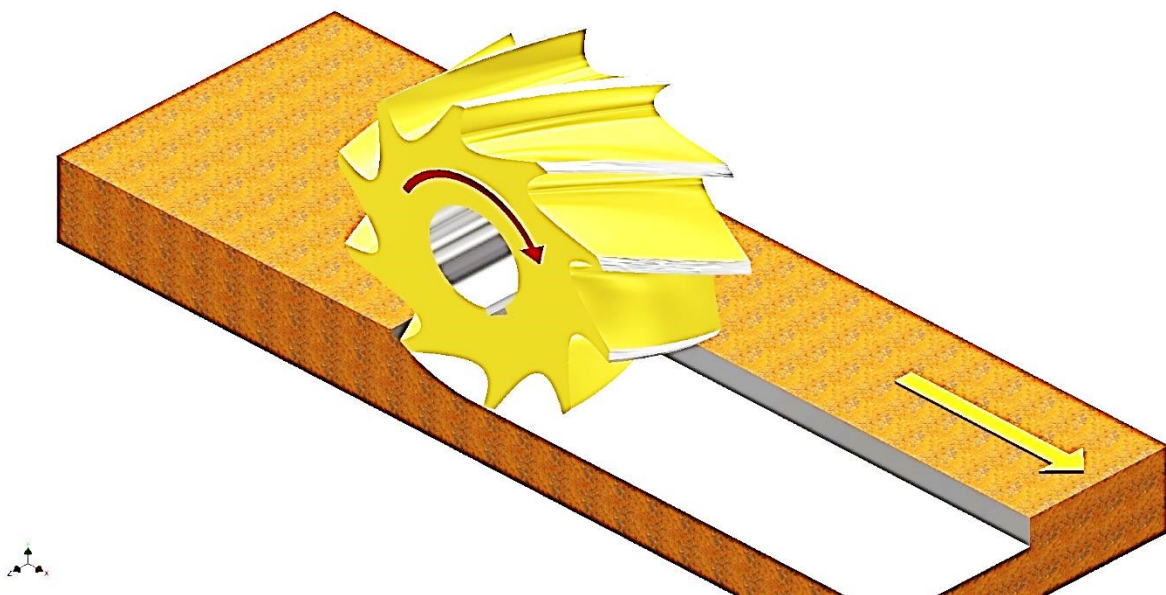
- **Sousledné frézování**
- **Nesousledné frézování**

Při **sousledném frézování** (viz. Obr. 2) je směr rotace nástroje (červená šipka) a směr posuvu obrobku (žlutá) stejný. Vytvořené třísky mají maximální tloušťku při vniknutí zubu frézy do materiálu, což zapříčiňuje zvýšené rázy. Vyvolané řezné síly působí obvykle směrem dolů. Pro kvalitní sousledné frézování musí být řádně přizpůsoben stroj, a to z toho důvodu, že materiál je vtahován pod frézu a může dojít k vibracím vlivem nevynezení vůlí. Nevhodné předpětí může vést k nestejněmu posuvu obrobku a zvyšuje se riziko poškození nástroje, či dokonce stroje. V případě zvýšeného výskytu oxidů v povrchu materiálu, se rovněž zvyšuje riziko brzkého otupení frézy. Výsledný obrobek bývá hladký. [2]



*Obr. 3 Kinematika sousledného frézování [3]*

Při **nesousledném frézování** (viz. Obr. 4) má rotace nástroje a posuv obrobku opačný směr. Tloušťka třísky se postupně zvětšuje. Roste z nulové až na maximální hodnotu a snižují se tak vznikající rázy. Třísky se neoddělují již v okamžiku její nulové tloušťky. K oddělení dochází po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Tyto skutečnosti zapříčiňují vznik silových účinků a deformaci, což způsobuje zvýšené opotřebení břitu. Vlivy řezné síly při protisměrném frézování, které působí zdola směrem nahoru, zapříčiňují odtažování obrobku od stolu. Vzniklý povrch mívá horší kvalitu. [2]

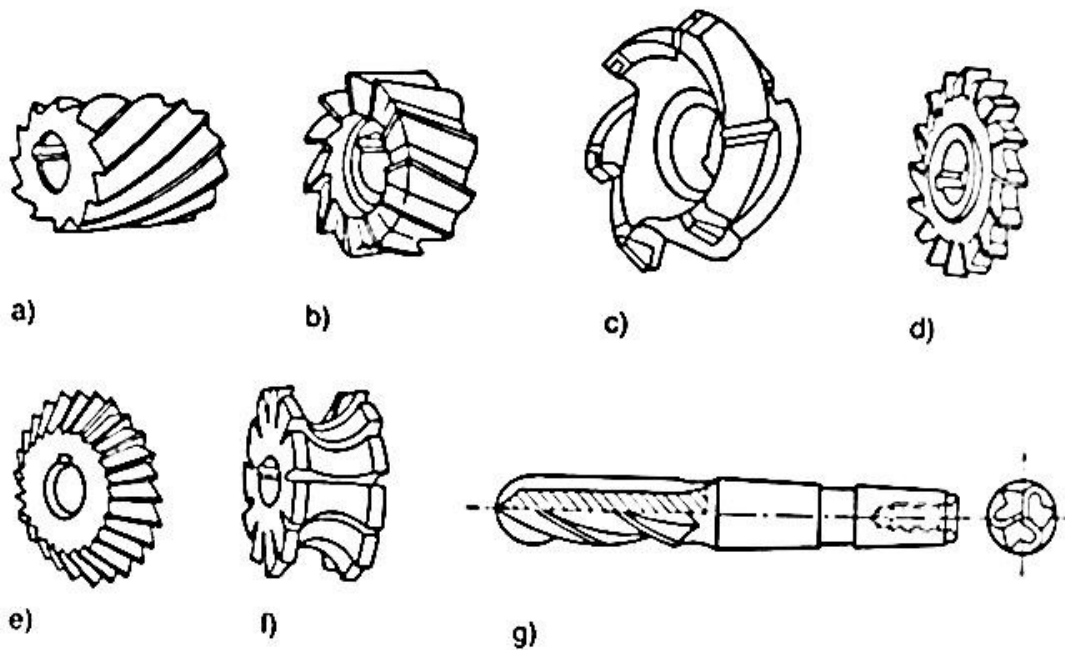


*Obr. 4 Kinematika nesousledného frézování [3]*



## 1.2 Frézovací nástroje

Za frézovací nástroje považujeme frézy. Jedná se o několikabřité nástroje, mající břity umístěny na různých tvarových plochách. Větší počet břitů je výhodný z hlediska chvění, čímž je docíleno, že v záběru je vždy více břitů současně. [2] Při frézovacích operacích vykonává fréza hlavní řezný pohyb-otáčivý a zároveň obrobek koná směr posuvný. Vzhledem k velkému rozsahu a různorodému uplatnění frézování ve strojírenství se v současné době využívá mnoha velikostí a typů nástrojů. Jejich zařazení se určuje dle různých hledisek, mezi které patří odlišné umístění břitů, tvary zubů, upínání, průběhy ostří či konstrukce. [1]



Obr. 5 Názorná ukázka vybraných typů fréz [1]

- a) **Válcové** – břity jsou umístěny pouze po obvodu frézy
- b) **Čelní** - břity umístěny po obvodu a na čele frézy
- c) **Frézovací hlava** - využití u strojů s velkým výkonem
- d) **Kotoučové** - břity umístěny na obou čelních i obvodové ploše, obrobení drážek
- e) **Kuželové** - břity umístěny na jedné nebo dvou kuželových plochách
- f) **Tvarové** - břity umístěny na tvarových plochách
- g) **Stopková fréza s kulovým čepem** [2]

## Rozdělení fréz dle různých kritérií:

- **Dle provedení zubů**

**Frézované zuby** - k vyhotovení mezer mezi jednotlivými zuby je využíváno kuželových fréz. [2] Plochy čela a hřbetu zuby jsou rovinné. Na hřbetě zuby je umístěna úzká faseta (0,5 – 2 mm), která zajišťuje zpevnění břitu. [1]

**Podsoustružené zuby** - hřbety zubů jsou obráběny na tzv. podtáčecích soustruzích. [1]

- **Dle průběhu ostří zubů**

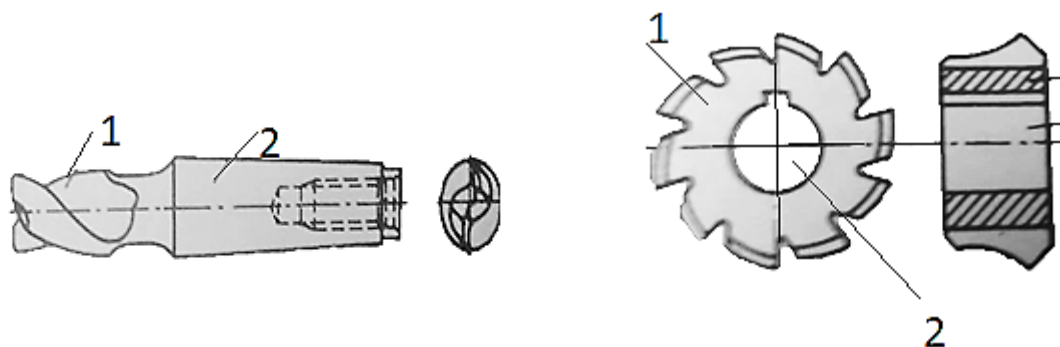
**S přímými zuby** - platí rovnoběžnost osy a zubů. [2]

**Se zuby do šroubovice** - zde rovnoběžnost neplatí. Zuby jsou pravotočivé nebo levotočivé. Předností toho uspořádání je, že záběr probíhá plynule v důsledku většího počtu zubů v záběru v daný moment a také postupného vnikání zuby na řezné délce nástroje. Obvykle se volí stoupání šroubovice od 10 do 45°, v ojedinělých případech i více. [1]

- **Dle upnutí nástroje**

**Stopkové** - skládají se z řezné části nástroje (1) a na koncích jsou vybaveny kuželovou či válcovou stopkou (2). [2]

**Nástrčné** - nasazení frézy obvykle pomocí středového otvoru. Skládá se z tělesa (1) a upínací otvoru (2). [2] Oba nástroje jsou vyobrazeny na *Obr. 6*.



*Obr. 6 Znárodnění stopkové (vlevo) a nástrčné frézy (vpravo) [2]*

## Dle konstrukčního řešení

**Celistvé (monolitní)** - výroba buďto přesným obrobením jednoho kusu rychlořezné oceli nebo také přesným odlitím. [1]

**Frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami** - břitové destičky bývají k tělesu nástroje pájeny nebo mechanicky upevňovány. V dnešní době se jedná o oblíbené konstrukční řešení fréz. [1]

**Skládané** - více fréz poskládaných v jeden celek, využíváno k frézování složitých tvarů. [2]

### 1.2.1 Nástrojové materiály

Ve strojírenství se za hlavní výrobní materiály považují rychlořezná ocel a slinuté karbidy. V omezené míře je využíváno řezné keramiky, kubického nitridu bóru a diamantu.

Ke zhotovení fréz z rychlořezné oceli je využíváno kovaných nebo válcovaných materiálů, popřípadě dochází k odlívání metodou vytavitelného modelu. Nejčastěji se používají oceli 19 802, 19 830, 19 824 a 19 856. U litých fréz potom ocel 19 824. Mezi výhody fréz z rychlořezné oceli patří poměrně snadný výrobní cyklus, dobře se ostří a také jejich pořizovací náklady bývají poměrně nízké. Naopak mezi negativa lze přičíst menší produktivitu frézování a nutnost použití řezné kapaliny. [1]

Většina frézovacích nástrojů je v dnešní době vyráběná ze slinutých karbidů (SK). Slinuté karbidy se dají charakterizovat jako vysoce tvrdé nástrojářské materiály a obvykle bývají tvořeny z karbidu wolframu či titanu (WC, TiC). Tělesa slinutých karbidů jsou převážně vyráběny ze směsí prášků kovů a jsou vytvářeny lisováním ve formovacích lisech. Vylisovaná tělesa podléhají procesu slinování, jsou umístěna do slinovací pece, ohřátá a následně zchlazená za řízených podmínek a působení inertních plynů. Nástroje se dělí do 6 skupin – P, M, K, N, S, H. [2]

## 1.3 Frézovací stroje

Frézovací stroje, označovány také jako frézky, mají velkou škálu konstrukčních řešení. Jednotlivé modely jsou odlišné velikostí a rozlišnými maximálními výkony. Zmíněná velikost stroje je odvozená od dvou faktorů. Prvním je šířka upínací plochy stolu a druhým velikost kužele ve vřetenu pro upnutí nástroje. Mezi další podstatné technické parametry řadíme maximální délku pohybu vřeteníku a pracovního stolu, výkon elektromotoru ovlivňující rozsah otáček vřetena a v neposlední řadě kvalitativní parametry obroběných ploch, kterých je možno dosáhnout, a které je nutno při volbě stroje brát v potaz. Frézky se obecně rozdělují do tří základních skupin - **konzolové, rovinné a speciální**. [1]

### 1.3.1 Konzolové frézky

Jedná se o nejpoužívanější typ ze všech frézek. Charakteristickou vlastností je upravitelná konzola (odvozen název) ve svislém směru vzhledem k vodící ploše stojanu, na které je uchycen podélný pracovní stůl sloužící k upnutí obrobku. Konzola tedy zajišťuje svislý posuv pracovního stolu, který je navíc schopen pohybu ve směru příčném a podélném. Souhrn těchto všestranných posuvů je obvykle realizován pomocí pohybových šroubů a matic. Rovněž umožňuje nastavení obrobku vzhledem k nástroji do libovolných poloh ve třech souřadnicích (x, y, z). Konzolové frézky se nejčastěji využívají k frézování rovinných či tvarových částí u menších a středně velkých obrobků v nesériové výrobě. Vyskytují se ve třech odlišných konstrukčních řešení - konzolové frézky **vodorovné, univerzální a svislé**. [1]

#### Konzolové frézky vodorovné

Pracovní vřetena bývají uložena horizontálně, rovnoběžně s plochou podélného stolu a kolmo vzhledem ke směru pohybu podélného stolu. Jsou hojně využívány především k frézování drážek pomocí kotoučových nebo tvarových fréz. Při obrábění složitých tvarů voleny skládané frézy. [1]



*Obr. 7 Fotografie konzolové frézky vodorovné [3]*

- **Konzolové frézky svislé**

Svislé konzolové frézky lze svou konstrukcí naprosto přirovnat k frézám vodorovným. Stěžejním znakem, kterým se tyto dva typy liší, je poloha pracovního vřetene, které je umístěno kolmo vzhledem k ose pracovního stolu. Vřeteno bývá uloženo ve svislé hlavě přichycené na stojanu, nebo je upevněno přímo na stojan frézky. Obvykle bývá upravitelné ve svislém směru. V případě realizace uchycení pomocí svislé hlavy je časté, že je možno natáčet vřeteno až o 45°.

Tento typ frézky bývá nejčastěji volen pro frézování rovinných ploch rovnoběžných s upínací plochou (tvorba drážek aj.) pomocí čelních či stopkových fréz. U strojů větších velikostí se využívají také frézovací hlavy. [1]



*Obr. 8 Fotografie konzolové frézky svislé [3]*

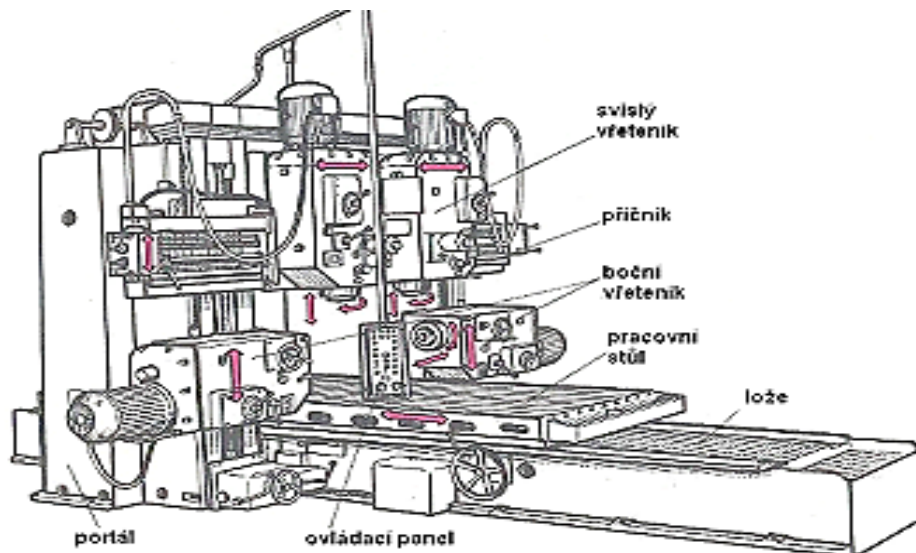
- **Konzolové frézky univerzální**

Svým řešením jsou opět velice podobné frézám vodorovným. Hlavní odlišností je možnost otočení pracovního stolu přibližně o  $45^\circ$ , čehož se využívá pro frézování mezer mezi břity fréz, šroubových drážek na vrtácích, šneků a další. [1]

### **1.3.2 Rovinné frézky**

Rovinné frézky se vyznačují vysokým výkonem a řadíme je mezi nejvýkonnější druhy. Jejich konstrukce je velmi robustní, což umožňuje frézování těžkých dílů. Často jsou využívány v kusové nebo malosériové výrobě, výjimečně potom ve velkovýrobě. Za hlavní odlišnost oproti konzolovým frézám považujeme fakt, že pracovní stůl vykonává pouze jeden pohyb po pevném lóži a to ve směru podélném. Vyskytují se ve dvou formách - stavebnicové či nestavebnicové konstrukce. Stavebnicová forma nabízí více možných variant, jak frézku sestavit. Lze kombinovat různé variace lóží, stolů, stojanů a vřeteníků. Do skupiny nestavebnicových řadíme frézky rovinné portálové, které jsou vhodné pro obrábění velkých a těžkých součástí. Skládají se ze dvou stojanů spojených příčnickem, na kterém je uchyceno obvykle více vřeteníků. Frézování obvykle probíhá za použití frézovacích hlavic, které jsou vhodné pro vodorovné, svislé a šikmé plochy. Pro drobnější úkony jako je tvorba drážek a opracovávání úzkých ploch jsou voleny frézy stopkové. [1]





Obr. 9 Rovinná frézka [3]

### 1.3.3 Speciální frézky

Jedná se o širokou škálu frézek mající vždy svou speciální obráběcí operaci.

- **Frézky na drážky** - disponují posuvným vřeteníkem v rovnoběžném směru s pracovním stolem. Tento pohyb umožňuje vyhotovovat drážky do hřídelů.
- **Frézky na vačky** - vyhotovení podoby vaček za pomoci křivkových bubnů a šablon nebo modelů.
- **Frézky na ozubení** - nejčastěji využíváno odvalovacích fréz. Jedná se o válcové tvarové frézy (šneky). Na fríze jsou vyhotovené drážky, díky kterým dochází ke vzniku ozubení.
- **Frézky na závity** - závity frézovány tvarovými kotoučovými, okružovacími nebo válcovými frézami.
- **Pantografické frézky** - využívány k vyhotovení číslic, písmen nebo obrobení tvarových ploch pomocí šablon. [2]

## 1.4 Řezné podmínky

Řezné podmínky jsou vždy pro daný typ práce specifické a jejich volba se odvíjí od vlastností frézek, nástroje, obrobku a prostředí, ve kterém obráběcí operace probíhá. Podstatnými faktory jsou také výsledná kvalita obrobené plochy, které chceme při frézování dosáhnout, společně se zvolenou kinematikou frézování (viz. kapitola 2.3). Je obvyklé, že každý distributor fréz uvádí v dostupných katalozích různé typy a rady, kterými je rozumné se řídit. Doporučené a orientační řezné podmínky jsou uváděny v literaturách a je možné si je dohledat. Názorný souhrn řezných podmínek je demonstrován na Tab. 1. Jedná se o běžně volené řezné rychlosti  $v_c$  a posuvu na zub  $f_z$ . [1]

Tab. 1 Řezné podmínky při frézování [1]

Materiál R <sub>m</sub> [MPa], HB	Nástroj	Frézovací hlavy		Kotoučové a válčové frézy			Čelní válčové a stopkové frézy	
		$v_c$	$f_z$	$v_c$		$f_z$	$v_c$	$f_z$
				hrubování	načisto			
		[m . min <sup>-1</sup> ]	[mm]	[m.min <sup>-1</sup> ]		[mm]	[m.min <sup>-1</sup> ]	[mm]
Ocel R <sub>m</sub> 500-800	RO	45	0,1 až 0,2	27	35	0,1 až 0,3	30	0,1 až 0,2
Ocel R <sub>m</sub> 800-100	RO	30	0,1 až 0,15	20	25	0,1 až 0,2	25	0,1 až 0,2
Ocel R <sub>m</sub> 500-800	SK	100	0,1 až 0,2	175	195	0,15 až 0,25	135	0,1 až 0,25
Ocel R <sub>m</sub> 800-100	SK	80	0,1 až 0,15	145	160	0,15 až 0,25	100	0,1 až 0,15
Šedá litina HB 160	RO	35	0,1 až 0,3	25	30	0,1 až 0,2	35	0,1 až 0,2
Šedá litina HB 200	RO	25	0,1 až 0,3				25	0,1 až 0,15
Šedá litina HB 160	SK (K10)	60	0,1 až 0,35	75	100	0,1 až 0,3	70	0,1 až 0,3
Šedá litina HB 200	SK (K10)	50	0,1 až 0,25				55	0,1 až 0,2
Hliník střední	RO	250	0,1 až 0,3	280	390	0,1 až 0,2	110	0,1 až 0,2
Hliník tvrdý	SK (K10)	700	25	550	650	0,1 až 0,2	650	0,1 až 0,2
Hliník tvrdý	SK (K10)	250	0,1 až 0,25				250	0,1 až 0,2

### 1.4.1 Vztahy pro výpočet řezných podmínek:

Frézky umožňují volit pouze některé veličiny, jako jsou otáčky vřetene a rychlost posuvu stolu. Další veličiny je potřeba dopočítat.

#### Výpočet velikosti řezné rychlosti $v_c$ , neboli obvodové rychlosti fréz:

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

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

$D$  - průměr frézy [mm]

#### Výpočet rychlosti posuvu $v_f$ :

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

$z$  - počet zubů frézy [-]

$f_z$  – posuv obrobku na jeden zub [mm]

#### Výpočet hodnoty posuvu obrobku na jeden zub $f_z$ :

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

#### Výpočet posuvu obrobku za jednu otáčku $f_o$ :

$$f_o = f_z \cdot z [\text{mm}] \quad (4)$$

#### Výpočet potřebného výkonu stroje $P$ :

$$P = \frac{a_e a_p v_f}{18\,000} [\text{kW}] \quad (5)$$

$a_e$  – šířka záběru [mm]

$a_p$  – hloubka řezu [mm] [4]

## **2 Možnosti technologie nekonvenčního obrábění v závislosti na velikosti dílů a technologii výroby**

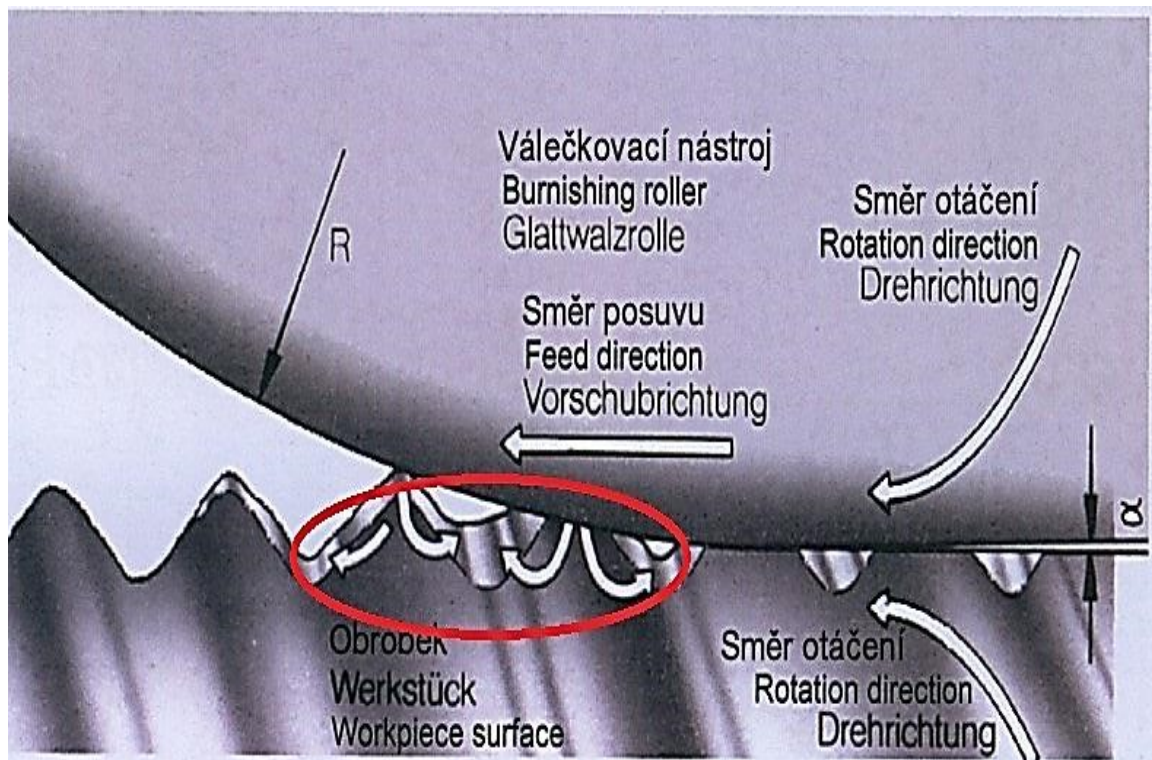
Na rozdíl od klasických (konvenčních) metod, při obrábění nekonvenčními metodami nedochází k třískovému úběru materiálu. Jedná se o opravdu širokou skupinu metod, které jsou založeny na různých fyzikálních jevech a principech. V mnohých literaturách jsou často označovány také jako fyzikální metody. Obrobky mohou být zbavovány přebytečného materiálu účinky tepelnými, chemickými, abrazivními nebo jejich kombinací. V následné části práce dojde k bližšímu přiblížení problematiky válečkování a obrábění pomocí ultrazvuku.

### **2.1 Válečkování**

V důsledku neustále se zvyšujících požadavků na vlastnosti a technické parametry výrobních strojů, je zároveň nezbytným krokem snaha o vývoj metod vedoucích k zvyšování úrovně technických parametrů jednotlivých strojních dílů. Jednou z těchto metod je také technologie válečkování, která se řadí mezi technologie dokončovací.

#### **2.1.1 Obecná charakteristika technologie**

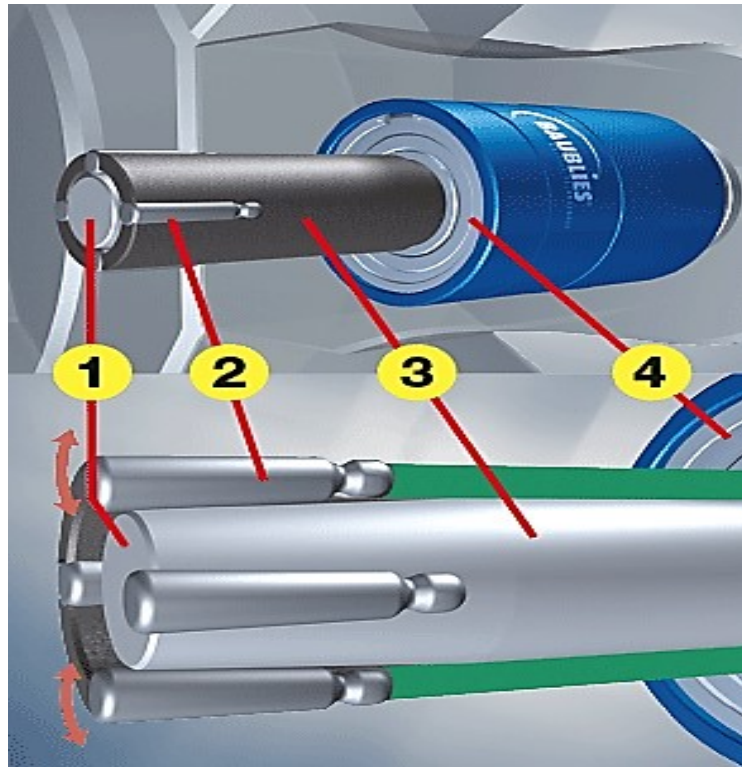
Jedná se o beztřískovou dokončovací metodu obrábění, využívající se pro zvyšování jakosti obrobených povrchů. Na rozdíl od klasických třískových metod nedochází k odebrání materiálu. Technologie se zakládá na principu přitlačení jednoho či většího počtu válečkových nástrojů k obrobku, což způsobí zvýšení tlaku na jeho povrchu a tím také překročení meze kluzu. Válečkovací nástroje se vyskytují v různých tvarech. Mezi běžně používané nástroje patří ty ve tvaru válečků, kuželíků, soudečků, aj. Jelikož se jedná o metodu dokončovací, nerovnosti vzniklé předchozím obráběním jsou tímto způsobem zarovnány s povrchem a plocha se stává rovnoměrnou. Velkou devízou válečkování je bezesporu fakt, že mluvíme o odstraňování nerovností a vad, které se pohybují řádově až v tisícinách milimetru. [5]



Obr. 10 Schématický popis technologie [6]

### 2.1.2 Princip metody

Jak už bylo zmíněno, princip této metody je založen na vyvíjení tlaku jednoho či více tvářecích prvků na obráběnou plochu (viz. Obr. 10). Působící síla bývá téměř kolmá. Je obvyklé, že válečkování se využívá ve chvílích, kdy po ukončení třískového opracování obrobku se na jeho povrchu vyskytuje přílišné množství mikronerovností a za nedostačující byly považovány i následné dokončovací operace. K vzniku námi chtěné síly (tlaku) dochází ve chvíli, kdy se dostane do vzájemného kontaktu nástroj s tvářenou plochou a nastává tvorba plastických deformací. Materiál z horních oblastí je stlačen do nevyplněných oblastí s nižším napětím, které jsou zespod postupně vyplňovány „přetečeným“ materiálem. Na Obr. 10 je tento krok zaznamenán červeně zvýrazněnými šipkami. Tímto způsobem je dosaženo zarovnání všech vad, vzniklých při předešlých obráběcích operacích, do téměř jedné roviny. Lze tedy říci, že na povrchu obrobku dochází k objemovým (přesun materiálu) a geometrickým úpravám (změna tvaru povrchu). [5] Názorná ukázka válečkovacího nástroje se čtyřmi tvářecími prvky viz Obr. 11.



*Obr. 11 Válečkový nástroj pro dokončování vnitřních otvorů [7]*

Během válečkování může otáčivý pohyb vykonávat buďto obrobek nebo nástroj, v ojedinělých případech oba. Na Obr. 11 můžeme vidět bližší popis nástroje. Kužel (1), na kterém je volně uchycena vložka nesoucí jednotlivé válečky (2), je pevně spojen s upínacím nástrojem (4). Zúženou částí kužele, nesoucí jednotlivé válečky, je vyvoláván tlak vedoucí k deformaci. [7]

Možnosti dokončovacího procesu ploch obráběných dílů pomocí válečkování mají svá omezení. V případě, že při výrobním procesu, ať již byla zvolena technologie frézování, soustružení, vrtání či jiná, došlo k vyhotovení hlubokých nežádoucích prohlubní, není válečkování vhodnou volbou. Válečkový nástroj je navržen pro kopírování povrchu a pro úpravu menších nepřesností a pro snížení drsnosti. V případě zmíněných hlubokých odřenin a trhlin je pravděpodobné, že po ukončení procesu budou vady stále patrné. Pro předejití těchto nežádoucích jevů, je při přípravě obrobku nutno dbát zvýšené pozornosti při volbě rezného nástroje, přídavku na obrábění a vzoru povrchu výchozího materiálu.

K docílení optimálního výsledku, má vliv nespočet faktorů. Řadíme zde velikost tlaku nástroje, který je schopný vyvinout na povrch dílu, tvar a kvalitu povrchu nástroje, mechanické vlastnosti materiálu, ze kterého byl nástroj vyroben, či původní drsnost a tvar mikronerovností na povrchu obrobku. [5]

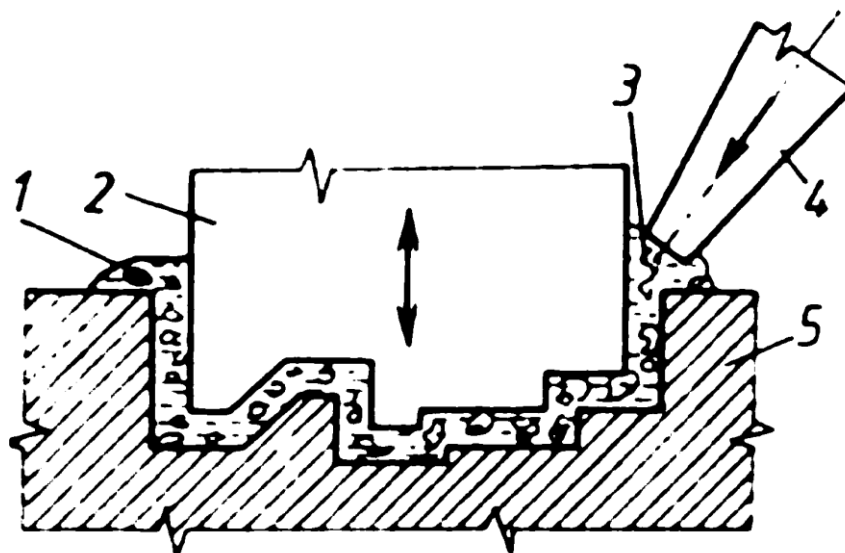


## 2.2 Ultrazvukové obrábění

Ultrazvuk má v dnešní době opravdu širokou škálu uplatnění se a zřejmě bychom těžko hledali někoho, kdo se s ním ještě ve svém životě nesetkal. Proto není divu, že jedním z těchto odvětví je také strojírenství, přesněji řečeno využití při obrábění materiálů. Ultrazvukové obrábění (ultrasonic machining) tedy využívá ultrazvuku, zvuku o velice vysokých frekvencích, který není lidské sluchové ústrojí schopno zachytit, tudíž se nejedná o činnost, která by měla být pro obsluhu nepříjemná. Využíván nebývá samostatně, ale je obvykle vhodným doplněním jiných technologií, čímž bývá dosaženo větší efektivity. Počátky technologie, která začala využívat ultrazvuku k obrábění materiálů, se datují k počátku druhé poloviny 20. století a v průběhu času dochází k různým zdokonalením této technologie.

### 2.2.1 Princip metody

Samotný ultrazvuk nemá dostačující možnosti pro obrobení materiálu. Metoda je založena na kombinaci ultrazvuku a jemného brusivého prášku, který má kýžený abrazivní účinek. Prášek může být složen z drobných zrnek diamantu, karbidu křemíku, kubického nitridu bóru či oxidu hlinitého. Ten je následně přidáván do kapaliny (voda, petrolej, líh, strojní olej). Celý princip (viz. Obr. 12) se zakládá na tom, že kapalina s abrazivem (3) je vstříkována tryskou (4) o vysoké rychlosti mezi obráběnou plochu materiálu, kde dochází k narušování povrchu nárazy zrn a obráběcího nástroje (2), který je rozpořehován ultrazvukem o frekvenci okolo 18 - 25 Hz. Následné přitlačení rozkmitaného nástroje s daným kalibrem na pracovní části o určité síle a rychlosti k rozrušenému materiálu způsobí vyhotovení požadovaného tvaru. K rozkmitání nástroje dochází pomocí ultrazvukového generátoru, který napájí piezokeramický měnič. Z něj jsou přenášeny kmity skrze koncentrátor až k samotnému nástroji. [8]



Obr. 12 Schématické zakreslení principu ultrazvukového obrábění [8]

Je důležité, aby všechny děje byly intenzivní, důkazem toho je nejen opravdu vysoká frekvence nástroje, ale také vysoký počet abrazivních částic rozrušujících povrch v kapalině, řádově se v ní nachází 30 - 100.000 na  $1\text{cm}^2$ . [8]

Technologie obrábění za pomoci ultrazvuku byla vyvinuta především pro materiály, jejichž povrchy jsou těžko obrobitelné, nebo se vyznačují vysokou křehkostí a tvrdostí do 10. stupně Mohsovy stupnice tvrdosti. Mezi materiály, které odpovídají charakteristice o vysoké tvrdosti a křehkosti, a které se také touto metodou často opracovávají, patří kupříkladu sklo, keramika, ferity, germanium, grafity, kevlar, mnohé polodrahokamy, aj. Zřídka kdy dochází k obrábění slinutých karbidů, z důvodu nižší tvrdosti je obráběcí proces znatelně obtížnější. Plastické materiály jsou pro svou nízkou tvrdost takřka neobrobitelné. Výhodou rovněž je, že nemusí být brán zřetel na elektrickou vodivost materiálu, obrábět se mohou jak vodivé tak i nevodivé. Z výše uvedených informací tedy vyplývá, že zde platí úměra, čím tvrdší materiál, tím je obrobitelnost lepší. Z Tab. 2 lze vyčíst hodnoty poměrné obrobitelnosti jednotlivých materiálů. Tvarové a velikostní limity obrábění jsou stanoveny velikostí nástroje. Je nezbytně nutné, aby vybraný nástroj měl vhodné rozměry, a aby lícoval s obráběným otvorem. [9]

Tab. 2 Poměrná obrobiteľnosť vybraných materiálov [9]

Obráběný materiál	Relativní obrobiteľnosť
Sklo	1
Rubín	0,9
Ferit	0,8
Germanium	0,6-0,3
Křemík	0,5
keramika	0,3
Achát	0,3
SK P10	0,05-0,02

Touto technologií lze dosáhnout drsnosti plochy až  $Ra = 0,4 \mu\text{m}$  a přesnosti při obrábění 0,01 mm, díky čemuž se s tímto druhem obrábění lze často setkat při výrobě šperků. Ultrazvuk je ale samozřejmě využíván především ve strojírenství, a to při operacích jako dělení materiálu, hloubení průchozích i neprůchozích děr, gravírování, frézování, a také při dokončovacích operacích.

Podoba výsledného obroběného povrchu materiálu je především odvozena od volby abraziva a jeho zrnitosti, vlastnostech obráběného materiálu a velikosti zvolené amplitudy. V případě zvolení abraziva, kde daná zrnitost brusiva je velice jemná, je možno dosáhnout nízké drsnosti plochy, která se může až pohybovat v intervalu 0,4 - 1,6  $\mu\text{m}$ .

Pokud je požadováno, aby výsledný obroběný povrch vykazoval vysokou kvalitu, je nutné zvolit co nejjemnější brusivo a malou amplitudu výchylky kmitu nástroje a mimo jiné zachovat pravidlo, že obráběný povrch musí dosahovat vysoké tvrdosti. Dále lze uplatnit metodu postupného obrábění. Při prvotních obráběcích operacích se volí hrubší brusivo, přičemž s každým dalším obráběním je použito brusivo s jemnějšími částicemi. V případě nejpresnějších operací je využíváno mikroprášků M3 ( $\sim 2 \mu\text{m}$ ) až M32 ( $\sim 17 \mu\text{m}$ ), které vykazují požadovanou vysokou jemnost. [9]

### 2.2.2 Ultrazvukové obrábění bez využití brusné kaše

Využití ultrazvuku se v dnešní době uplatňuje u celé řady technologických operací a není již nutné bezpodmínečné vhnání kaše s brusivem. U moderních obráběcích center,

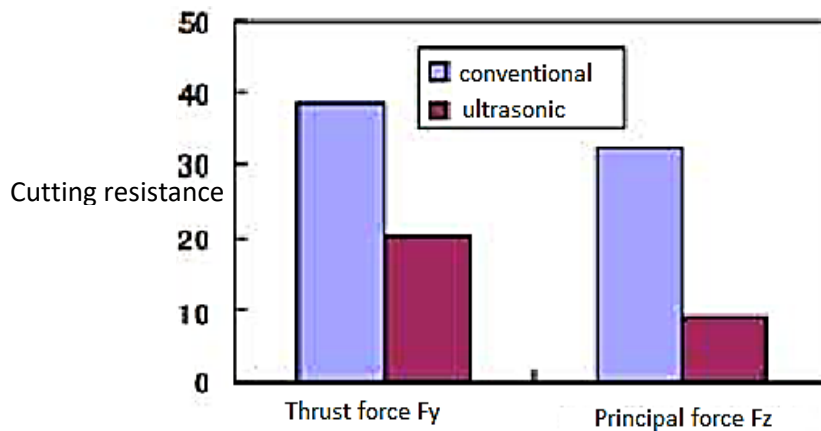
kteře v dnešním strojírenství hrají prim, se setkáváme s kombinací technologicky vspělých konvenčních nástrojů (nožů, rotačních disků, aj.), indukčně propojených piezoelektrickými elementy. Ty produkují vysokofrekvenční ultrazvukové kmity, které rozkmitávají obráběcí (obvykle řezný) nástroj. Kmity jsou orientovány ve směru řezné rychlosti a mají pozitivní vliv na deformační účinky obrábění (snížená síla potřebná k oddělení materiálu). Princip přenosu ultrazvukových kmitů indukčními cívkami na vřeteno s nástrojem (v tomto případě gravírovací nástroj) je zachycen na Obr. 13.



*Obr. 13 Nákres přenosu ultrazvukových kmitů indukčními cívkami na vřeteno [10]*

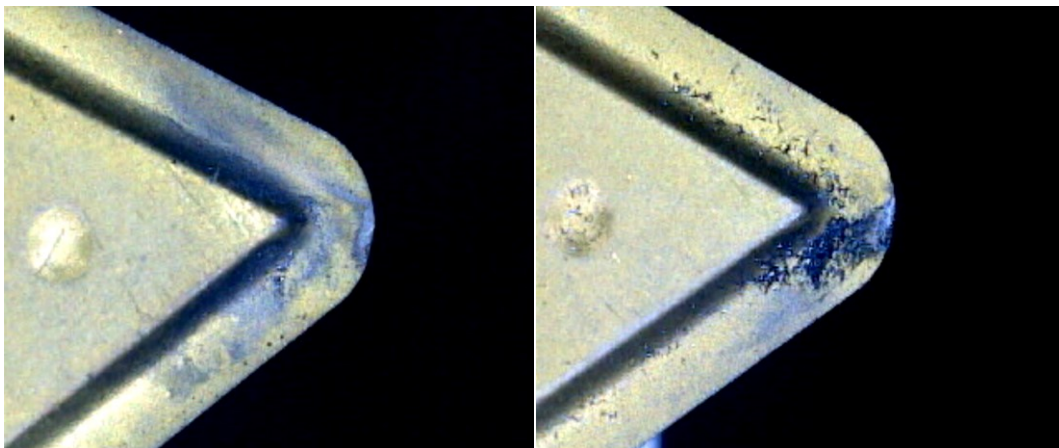
Mezi zmíněné technologické operace patří řezání (dělení) materiálu. V případě volby technologie dělení materiálu za dopomoci ultrazvuku je možno řezat materiály s různými charaktery. Jedná se o materiály s velmi vysokou tvrdostí (kubický nitrid bóru, diamant), běžně využívané materiály (oceli, litiny, neželezné kovy), ale také o velmi měkké (nevulkanizovaná guma, textil, voštiny), u kterých při běžném konvenčním řezání hrozí riziko přilepení se k nástroji, znehodnocení materiálu či deformace struktury. Ultrazvukovým řezáním redukuje množství sil, kterých je potřeba vyvinout k rozdělení materiálu asi okolo 75%. Tento proces, kdy při použití ultrazvuku klesá řezný odpor  $N$ , je demonstrován na přiloženém diagramu (viz. Obr. 14), kde jsou srovnávány působící síly v případě ultrazvukového (fialové sloupce) a konvenčního řezání (modré sloupce). Z výše hodnot,

kteře jednotlivé síly vykazují, je jasně patrné, že při použití ultrazvuku jsou tahové síly ( $F_y$ ) na nástroj redukovány zhruba o polovinu a hlavní síla ( $F_z$ ) snížena takřka na čtvrtinu. [10]



Obr. 14 Závislost řezného odporu konvenční a ultrazvukové technologie řezání [10]

Snížené množství působících sil na nástroje ovlivňovaných ultrazvukem vede k prodloužení jejich životnosti. Na Obr. 15 je znázorněno porovnání dvou řezných špiček, při čemž levý nástroj je díky uplatnění ultrazvuku při procesu řezání znatelně méně znehodnocen.

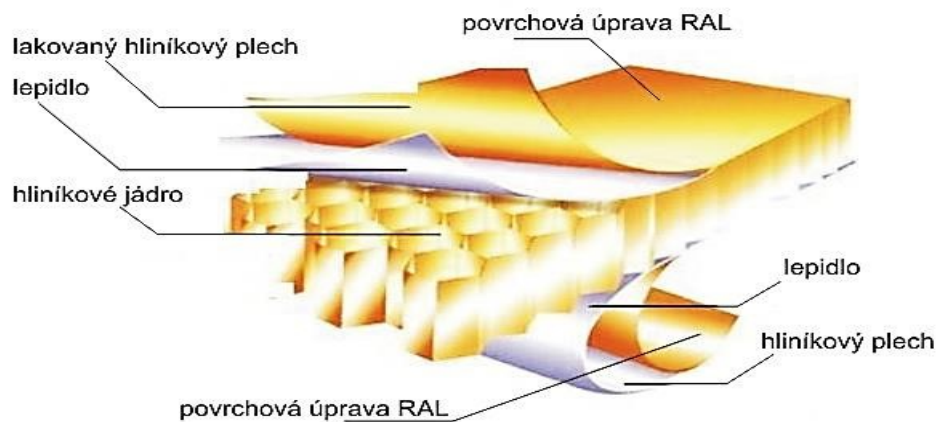


Obr. 15 Porovnání špiček nástrojů - ultrazvuková (vlevo) a konvenční (vpravo) [10]

### 2.2.2.1 Ultrazvukové obrábění voštin

Při rozboru této problematiky je v první řadě nezbytné, definovat si, co si pod slovem voština vůbec představit. Jedná se o materiál, který bývá využíván jako jádro u sendvičových kompozitů. Mohou mít různou výšku, velikost a tvar jednotlivých otvorů. Na Obr. 16 je v jednoduchosti vyobrazena konstrukce sendvičového kompozitu, v tomto případě

s hliníkovým jádrem (voštinou) s typickými jednotlivými buňkami, které připomínají tvarově včelí plástve.



*Obr. 16 Sendvičový kompozit s hliníkovým jádrem [11]*

Ultrazvukové obrábění není žádnou výjimkou, co se vývoje týče. S velice zajímavým a inovativním řešením přišla na trh francouzská společnost Creno. Povedlo se jí zkonstruovat stroj CRENO HSC 5 Axis tak, že je schopen provádět dvě různé obráběcí operace. Jedná se o tradiční frézování a ultrazvukové řezání voštin, které jsou následně obvykle využívány jako jádra do sendvičových kompozitů. Stroj je vybaven 5 - osou hlavicí, což dává přístroji velkou polohovací variabilitu a umožňuje řešit i komplikovanější tvarové požadavky. Ultrazvuková hlavice, která je k nahlédnutí na *Obr. 17*, má navíc integrovaný chladicí systém nástroje. Celý proces je řízený pomocí CAM systému, v kterém je plánována celá strategie řezání a lze využít také vzorových simulací. Na rozdíl od klasického ultrazvukového obrábění, zde se abrazivum nevyužívá. [12]



*Obr. 17 Ultrasonická hlavice [12]*

#### **Výhody ultrazvukového řezání:**

- Snižuje množství odpadu a zabraňuje vzniku třísek
- Vysoká profilová přesnost
- Zvýšená kvalita dílů bez deformace struktury voštinového tvaru
- Zaoblené hrany (zkosení okrajů až do 1 mm)
- Zvýšená produktivitu [12]

#### **Obráběcí postup:**

- Hrubování
- Dokončování povrchu
- Vyřezávání detailů



*Obr. 18 Postup při prvotním hrubování profilu [12]*



Prvním krokem při přípravě kompozitního jádra je velkoplošné třískové vyfrézování daného povrchu a prvotní úprava výšky materiálu. Výchozí deska je umístěna na vakuovém stole a přichycená lepícím filmem. Obvyklým nástrojem bývá čelní nasazovací fréza (viz. Obr. 19). Výsledný povrch má vysokou drsnost a obsahuje velké množství vad a nerovností. Při hrubování je možnost využití sacího systému, který sbírá vzniklé úbytky materiálu.



*Obr. 19 Fréza k hrubování [12]*

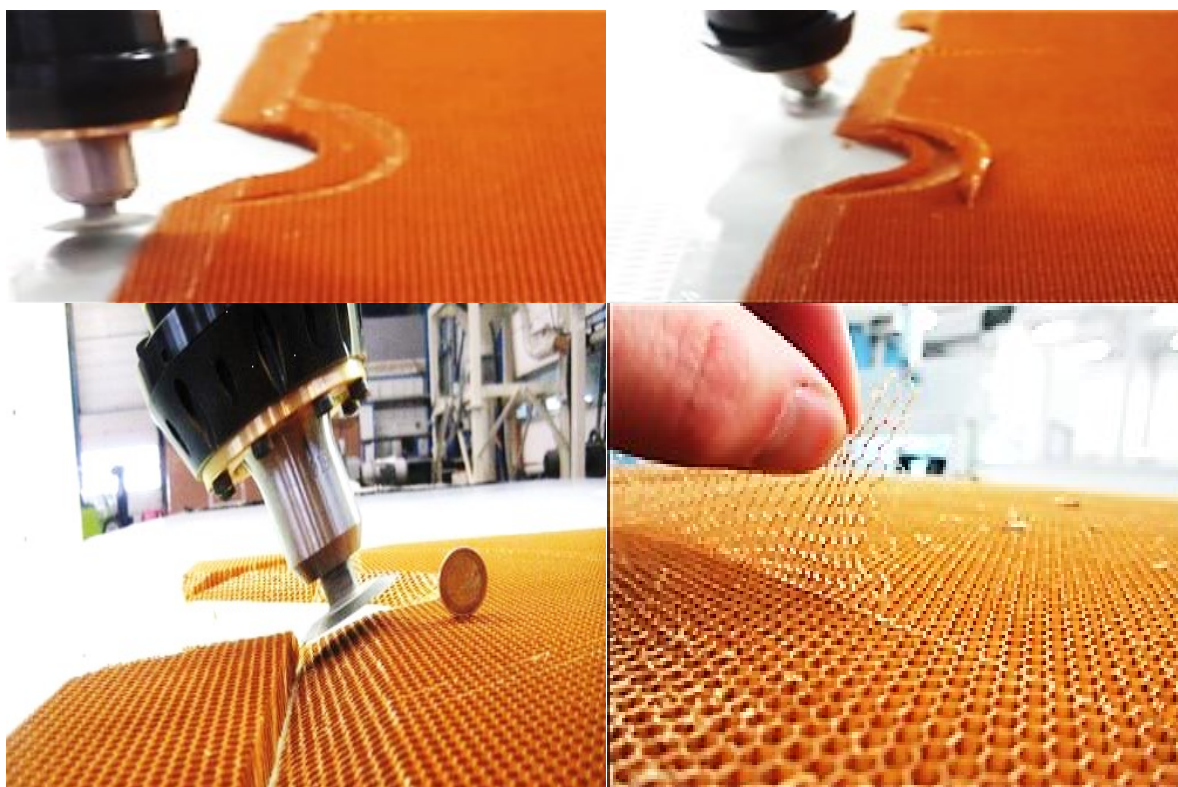
*Tab. 3 Řezné podmínky při frézování [12]*

Výkon	10-20 kW
Rychlost otáček	20 000-24 000 m.min <sup>-1</sup>

Z důvodu vysoké drsnosti a nedostačující jakosti povrchu je potřeba vzniklé nedostatky zarovnat a povrch dokončit. K této operaci slouží rotační disk s ultrazvukovým kmitáním (viz. Obr. 20). Umožňuje dokončovat povrchy, řezat velmi tenké vrstvy a zároveň díky variabilní hlavici vytvářet složité tvarové výřezky menší hloubky a různého sklonu. Průběhy jednotlivých operací jsou zachyceny na Obr. 21.



*Obr. 20 Rotační disk připraven k upevnění do ultrazvukové hlavičky [12]*



*Obr. 21 Tvarové výřezy vyřezané ultrazvukovým rotačním diskem [12]*

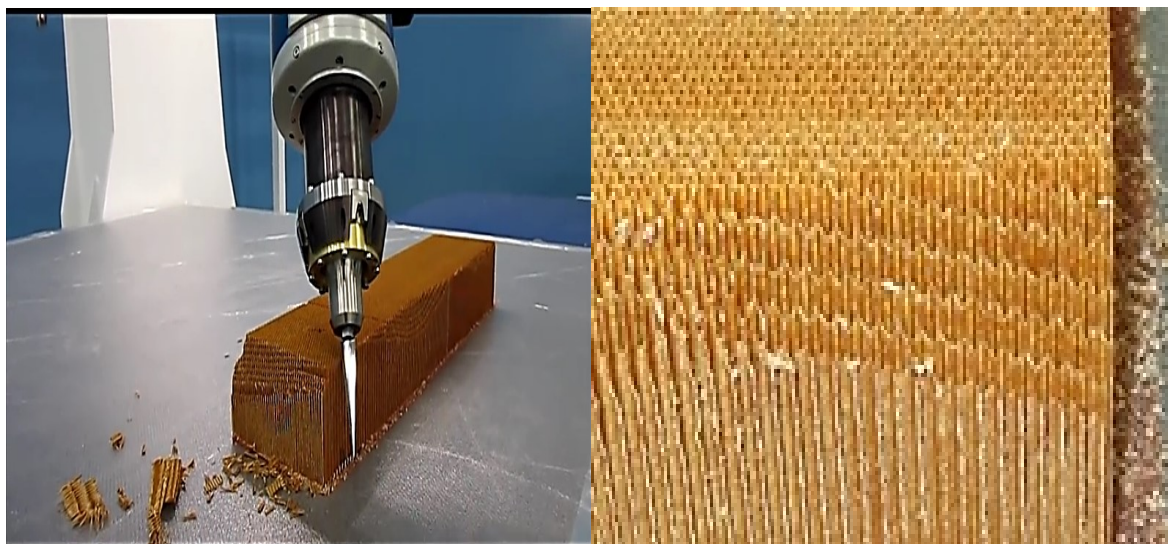
Třetí a poslední varianta, kterou nám stroj CRENO HSC 5 Axis nabízí, je ultrazvukové řezání pomocí nože. Ten je určen k hlubším řezům, které obvykle oddělují větší kusy materiálu. Díky tomu, že břit nože je rozkmitáván ultrazvukovou frekvencí až 20 000 kmitů za vteřinu, je řez materiálem značně ulehčen a lze jej provést mnohem přesněji. Výhodou rovněž je fakt, že při operaci nevzniká odpad (třísky).



*Obr. 22 Ultrasonický nůž [12]*

*Tab. 4 parametry nástrojů[12]*

Ultrasonické nástroje	
Délka ostří nože	Až 85 mm
Průměry rotačních disků	12,7; 25,4 nebo 50,2 mm



*Obr. 23 Upnutý nástroj v ultrazvukové hlavici společně s detailem řezu [12]*

V dnešní době, kdy se v průmyslu se sendvičovými kompozity lze setkat velice často, může být tato technologie velkým přínosem. V důsledku vysokých nároků na tvarovou obtížnost dílů, je velkou výhodou, že profily vyhotovené na CRENO HSC 5 Axis se vyznačují opravdu velkou škálou tvarů, kterých je možno pomocí tohoto důmyslného stroje dosáhnout. Názorná ukázka konečného vzezření jádra vyhotoveného touto technologií je zachycena na Obr. 24



*Obr. 24 Konečná fáze voštinového jádra [12]*

### **3 Vlastnosti povrchů dokončené nekonvenční technologií**

Dokončování povrchů je významnou částí výrobního průmyslu. Progresivními a inovativními technologiemi z této oblasti jsou válečkování a mikrokování za studena. Obrobky po dokončení povrchu těmito technologiemi získávají užitečné vlastnosti vedoucí k prodloužení životnosti a zlepšení mechanických vlastností.

#### **3.1 Vlastnosti povrchů dokončené válečkovou technologií**

Válečkování disponuje ve srovnání s dokončovacími technologiemi třískového charakteru některými výhodnými možnostmi. Nejenže upravované povrchy zbavuje mikronerovností. Pomocí válečkování lze dosáhnout zlepšení povrchových parametrů obrobku, mezi které patří zvýšená odolnost na únavové lomy, vyšší nosnost a v neposlední řadě vysoká otěruvzdornost. Tyto kýžené vlastnosti jsou docíleny tím, že na obráběnou plochu nepůsobí tepelné vlivy a vrubové účinky, které jsou typickými průvodními jevy u třískového obrábění. [5]

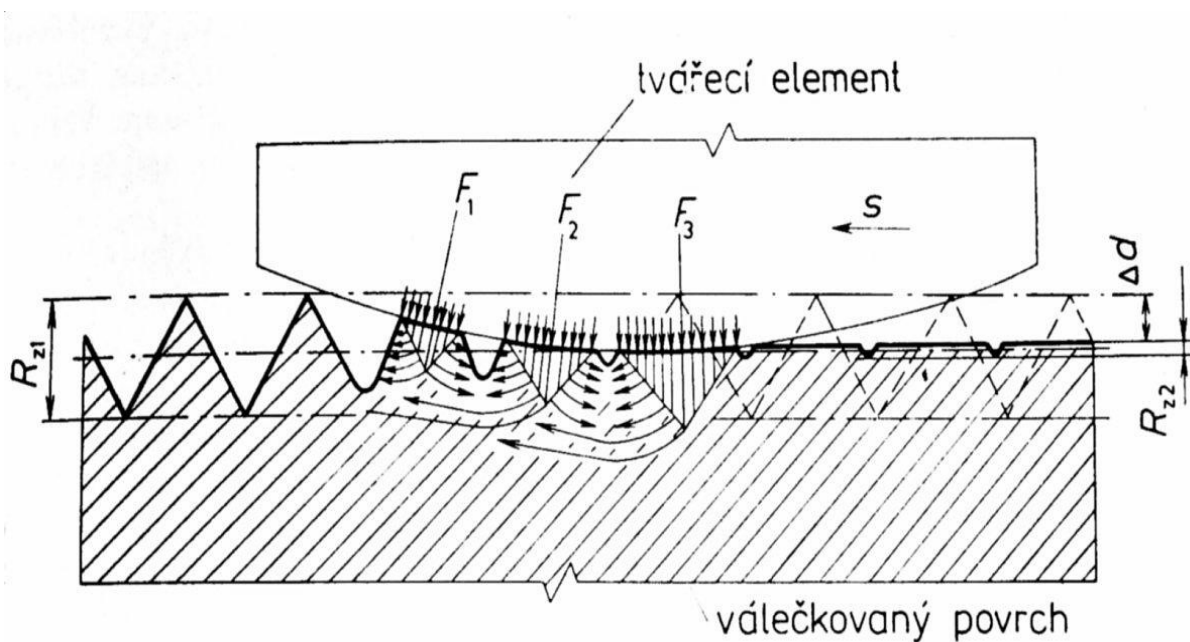
##### **3.1.1 Zpevnění povrchové vrstvy materiálu**

Při obrábění válečkováním nedochází pouze k úpravám povrchových nedostatků. Procesem dochází také k trvalým změnám v metalurgické struktuře vrstvy materiálu, vyvolaných přemístěnými vrstvami atomů po skluzových rovinách a následnému zpevnění. Zrna pod povrchem jsou deformována působením tvářecí síly a dochází k prodlužování zrn.

Je obvyklé, že u vnějších vrstev, které jsou v přímém styku s tvářecím nástrojem, dochází k většímu zpevnění v porovnání s vrstvami vnitřními. Jednotlivé míry zpevnění jsou jiné pro různé druhy kovů, což je dáno odlišnými krystalovými mřížkami. Změny v krystalových mřížkách zapříčiňují také změny mechanických vlastností. Do tohoto výčtu můžeme řadit snížení vrubové houževnatosti či tažnosti a zvýšení maximálních hodnot meze kluzu, pevnosti a tvrdosti materiálu. Navýšení pevnosti povrchové vrstvy bývá různorodé, hovoříme o 20-100% navýšení, v extrémních případech dokonce i o více než 100%.

Vytvořené nové zpevněné vrstvy, ve kterých působí vhodná tlaková pnutí, mohou dosahovat až několika milimetrů a strojní součásti dávají vyšší možnost zamezení rizika vzniku lomu. Nejčastějším druhem lomu, s kterým se strojírenství potýká, je lom únavový a právě tato hrozba je utvořením zpevněné vrstvy výrazně snížena. Vhodné rozložení vnitřních sil v povrchové vrstvě (viz. Obr. 25) dává součásti zvýšenou únavovou pevnost.

Naopak tlaková pnutí vyskytující se na povrchu obrobene plochy pomocí válečkování, zamezují tvorbě povrchové koroze, šíření trhlin a eliminují vliv mikrovrubů. [5]

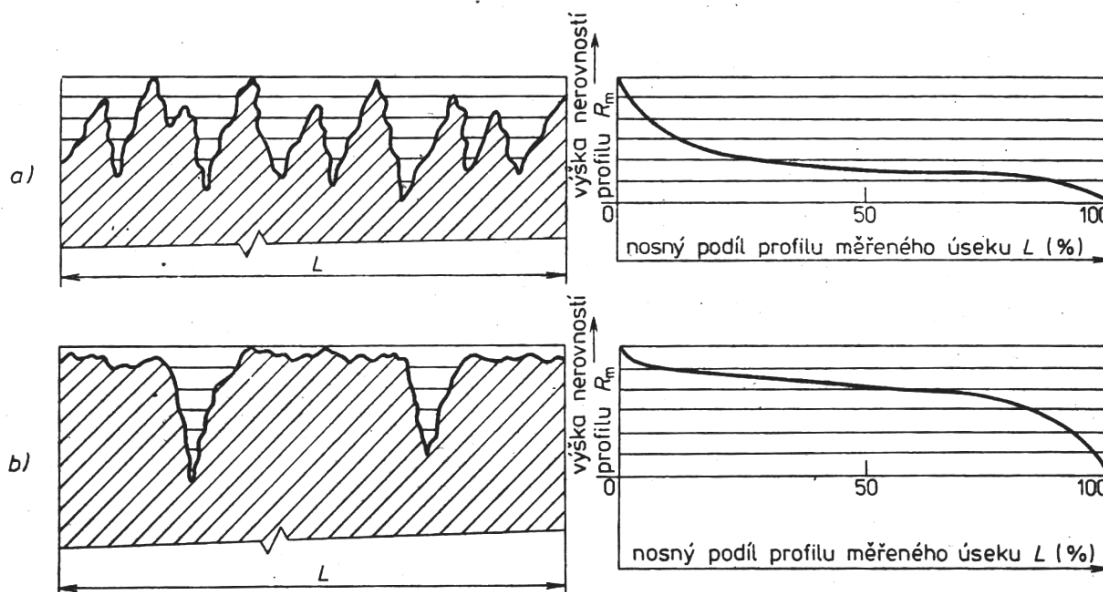


Obr. 25 Popis procesu zpevňování materiálu a popis působení sil [5]

### 3.1.2 Vyhlazování obrobenech povrchů válečkováním

Nicméně válečkování, jakožto dokončovací operace, má obvykle za hlavní úlohu povrch po předchozích třískových operacích, popřípadě nedostačujících dokončovacích operacích, vyhladit a dokončit úpravu povrchu tak, aby odpovídal požadavkům na podstatně nižší drsnost. Úprava drsnosti je založena na snižování výšky mikronerovností.

Na Obr. 26 je zachyceno srovnání povrchů dokončených metodou válečkování s běžnými třískovými obráběcími metodami. Z levé části je jasně patrné, že po uplatnění metody válečkování (viz. sektor b) se charakter drsnosti zcela změní a nastává velké zdeformování vrcholů nerovností do celistvější rovin. Při porovnání křivek nosného podílu lze vyčíst, že při použití metody válečkování, došlo k jeho více než dvojnásobnému nárůstu. [5]



Obr. 26 Nosné profily povrchů [5]

Tab. 5 Hodnoty nosného podílu a drsnosti vzniklých pomocí různých technologií obrábění [5]

Způsob obrábění	Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Nosný podíl [%]
Hrubé soustružení a vrtání	6 až 25	10
Soustružení na čisto	2,5 až 10	25
Jemné soustružení	1 až 4	40
Broušení na čisto	0,6 až 2,5	40
Jemné broušení, honování, lapování	0,16 až 0,6	80
Superfinišování	0,04 až 0,1	90
Válečkování	0,2 až 0,4	80 až 90

Pro dosažení námi zvolené drsnosti povrchu při válečkování je nezbytnou podmínkou vhodné nastavení pracovních podmínek a splnění všech faktorů, které mohou mít vliv na konečný výsledek. Je nutné, zamyslet se nad mechanickými vlastnostmi materiálu a zvolit vhodný pracovní nástroj tak, aby byla vyvinuta dostatečně velká tvářecí síla, splněna dostatečná jakost nástrojového materiálu a vhodná tvarová geometrie nástroje. Dále je potřeba zvolit odpovídající posuv nástroje a vzít v potaz původní drsnost a tvar mikronevlností na součásti vzniklých předešlými operacemi. [5] Jednotlivé doporučené tlaky při válečkování odvíjející se od daného materiálu a obráběcí metody jsou zapsány v Tab. 6.



Tab. 6 Doporučené velikosti tlaků pro dokončování povrchu válečkováním [5]

Obráběný materiál	Předchozí operace		Doporučený tlak [MPa . 10 <sup>2</sup> ]
	Způsob obrábění	Drsnost povrchu Ra [μm]	Válečkování
Uhlíková ocel	Soustružení	6,3 až 50	8 až 11
	Vyvtávání	6,3 až 25	4 až 8
	Hoblování	3,2 až 12,5	2 až 4
	Broušení	1,6 až 3,2	3 až 6
	Vystružování	do 1,6	2 až 4
Legovaná ocel	Soustružení	6,3 až 50	12 až 14
	Vyvtávání	6,3 až 25	10 až 12
	Hoblování	3,2 až 12,5	5 až 8
	Broušení	1,6 až 3,2	5 až 8
	Vystružování	do 1,6	4 až 6
Mosaz	Soustružení	6,3 až 50	8 až 11
	Vyvtávání	6,3 až 25	6 až 8
	Hoblování	3,2 až 12,5	4 až 6
	Vystružování	1,6 až 3,2	2 až 5
Litina	Soustružení	6,3 až 50	9 až 11
	Vyvtávání	6,3 až 25	6 až 8
	Hoblování	3,2 až 12,5	6 až 8
	Broušení	1,6 až 3,2	4 až 7
	Vystružování	1,6 až 3,2	2 až 5

Velkou výhodou ve srovnání s třískovými technologiemi je také to, že výsledný povrch u metody válečkování je lesklý, a tudíž jsou také zřetelněji viditelné případné vady materiálu. Ty bývají utvářeny buďto během metalurgických operací (vměstky, póry), dále v důsledku narušení pracovního povrchu válečkovaného obrobku (oděrky, studené sváry), nebo při předchozí úpravě třískovou metodou (chybějící materiál). Výskyt těchto vad bývá různý. Vady jsou příznačné pro nekvalitní odlitky. Výsledná lesklost povrchu je samozřejmě doprovázena nízkou drsností obrobenej plochy. [5] Souhrn dosažených drsností jednotlivými technologiemi je znázorněn v Tab. 7.

Výhodou válečkování při porovnání se srovnatelnými metodami (lapování, honování, leštění) je fakt, že válečkování sebou nenese tak velké požadavky na strojní příslušenství a kvalifikovanost osob.

Tab. 7 Porovnání drsností, kterých lze dosáhnout jednotlivými technologiemi [5]

Způsob dokončování povrchu	Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Válečkování	0,1 až 0,8
Leštění	0,1 až 0,4
Lapování	0,1 až 0,4
Honování	0,1 až 0,4
Broušení	0,3 až 0,1
Vyvtání	1,1 až 1,6
Vystružování	0,9 až 1,6
Soustružení + smirkování	1,0 až 1,6
Soustružení	1,6 a více

### 3.1.3 Mikrokování za studena (cold forging)

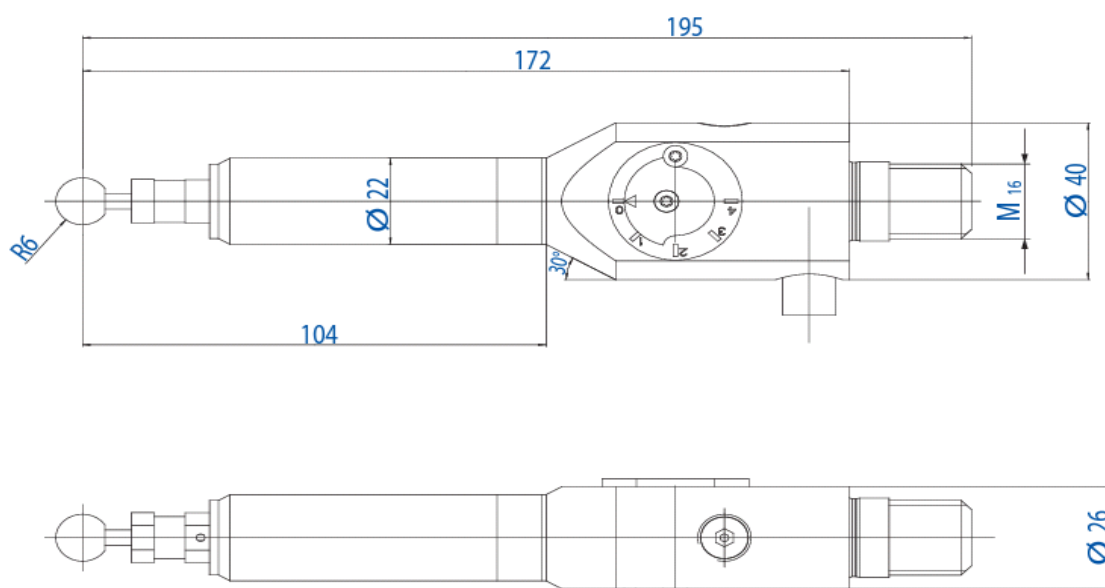
Technologie kování za studena je další z řady dokončovacích beztrískových technologií, vedoucí k vhodným úpravám povrchů. Jejím účinkem, podobně jako u klasického válečkování, dochází primárně k úpravě povrchu materiálu na požadovanou drsnost. Stejně tak nese sebou rovněž efekt vyleštění povrchu a zhutnění povrchové vrstvy. Nástroj (kladívko) se systematicky pohybuje nad povrchem obrobku pomocí CNC obráběcího stroje či robotu (viz. Obr. 27 až Obr. 29) při využití klasických NC programů. Tyto faktory vedou k závěru, že ovládání procesu mikrokování za studena je v zásadě jednoduché. Jedná se o vynikající způsob povrchové úpravy a lze jej srovnávat se známými metodami jako leštění laserem nebo hloubkové válečkování.

Mohou být vytvořena přídatná konstrukční řešení, jako jsou kapsy pro mazání, které napomáhají zlepšit třecí vlastnosti. Při mikrokování dochází k optimalizovanému rozložení zbytkového napětí, což zabraňuje tvorbě trhlin na součástech, které bývají vystavovány změnám napětí a prodlužuje se tak jejich životnost.

Na Obr. 27 a Obr. 28 je představen pneumatický nástroj pro kování za studena FORGE fix®P od společnosti POKOLM. Ten je vhodný při požadavcích na vysoce kvalitní, ekonomicky únosné a opakovatelně reprodukovatelné vyhlazení povrchu. Lze jej upnout do vřetena CNC frézky a především je vhodným nástrojem k dokončování tvarových ploch. [13] Jeho technické parametry jsou zaznamenány v Tab. 8.



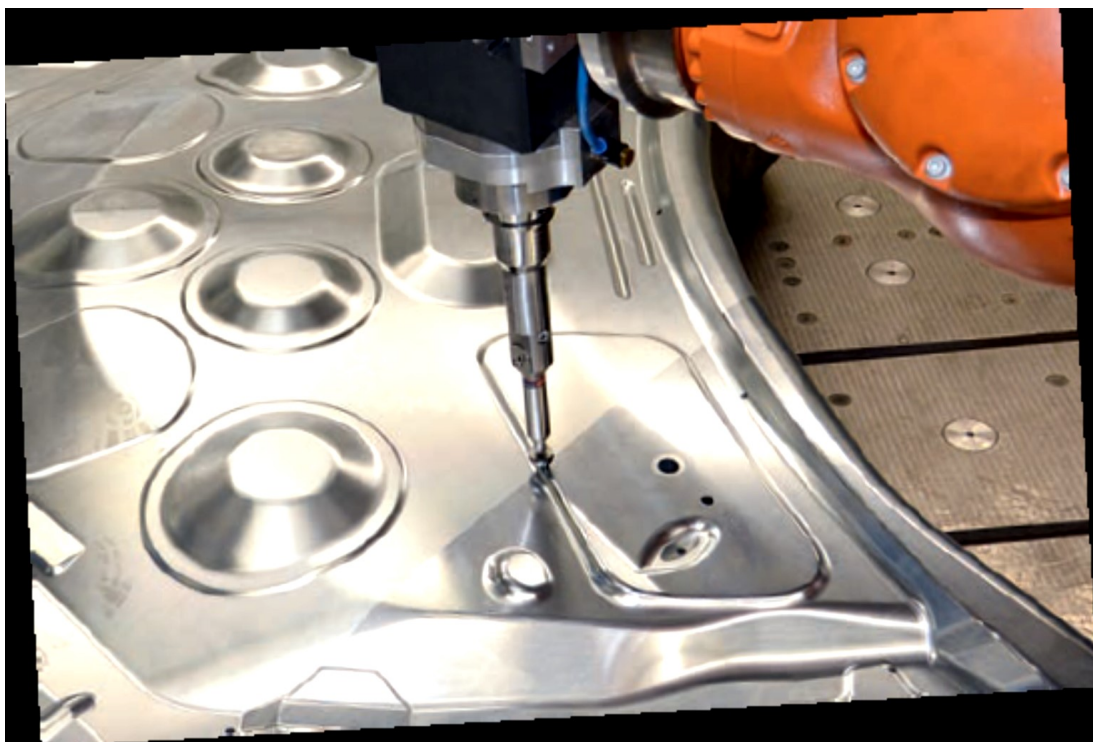
Obr. 27 Nástroj pro mikrokování za studena [13]



Obr. 28 Okótované rozměry nástroje FORGE fix®P [13]

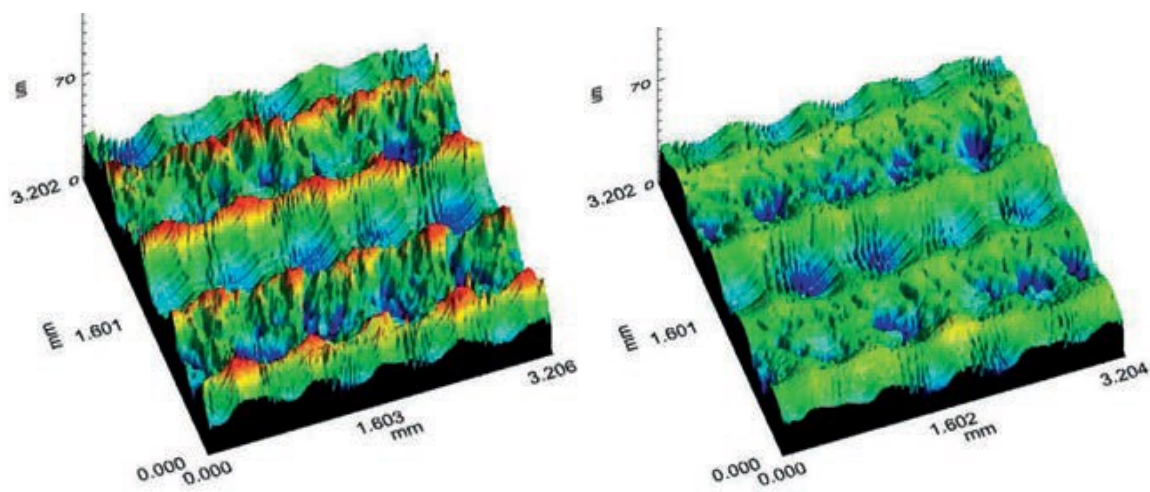
Tab. 8 Parametry nástroje [13]

Délka	195 mm
Průměr	40 mm
Závitová stopka	M16
Nastavení zdvihu	0 - 4 mm
Frekvence $f$ při 6 barech	> 200 Hz



*Obr. 29 Pracovní nástroj uchycený robotem ve výrobě [13]*

Obr. 30 znázorňuje optimalizaci nedostatečně opracovaného povrchu. Na graficky znázorněném reliéfu povrchu v levé části jsou jasně patrné červeně a žlutě vyjádřené nerovnosti, vzniklé předchozí obráběcí operací, v tomto případě se jednalo o frézování. Při uplatnění mikrokování za studena a využití pneumatického nástroje FORGE fix®P, došlo k dokončení povrchu, tedy snížení výšky nerovností.



*Obr. 30 Povrch po frézování (vlevo) a po zpracování za studena (vpravo) [13]*

**Výhody mikrokování za studena:**

- Úprava tvarových povrchů nástrojů a forem podle NC datových souborů.
- Použití na strojích, jako jsou standardní CNC obráběcí stroje, roboty a podobně.
- Žádné negativní tepelné účinky (jako jsou ty, které jsou způsobeny dlouhou dobou provozu během elektrodynamického kování za studena).
- Praktický nástroj.
- Lze automaticky vyměnit. [13]

## 4 Možnosti využití technologie nekonvenčního obrábění

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, využití technologie válečkování se využívá k úpravě povrchů a ke změně parametrů povrchové vrstvy. Co prozatím nebylo uvedeno, je to, jaké povrchy lze touto technologií obrábět. Uplatnění, dle zvolené technologie, je opravdu různorodé a je možno obrábět jak plochy vnitřní (otvory) tak i vnější v různých provedeních. Nástroje jsou konstruovány pro úpravu ploch rovinných, válcových, kuželových, kulovitých, různých průměrů s i bez odsazení, zkosených, slepých i průchozích otvorů, drážek, vybrání, zahloubení, aj.

### 4.1 Nástroje s diamantovým hrotem

Jednou z nejmodernějších inovací v oblasti válečkování je využívání diamantových hrotů. Diamant, jakožto nejtvrdší přírodní krystal (stupeň 10 dle Mohsovy stupnice), je ideálním řešením problematiky vyhlazování povrchů u materiálů (obvykle kalených), jejichž tvrdosti mohou dosahovat hranice 60 HRC.

Vhodně upravený, vysoce leštěný diamant odpovídající kvality je přitlačován k ploše obrobku. Následné pochody jsou obdobné jako u klasického válečkování, po překročení meze kluzu jsou vrcholy nerovností po předchozím obrábění stlačovány do prohlubní, výsledkem je kýžený rovnoměrný povrch o velice nízké drsnosti. Vzhledem k tomu, že styčná plocha mezi obrobkem a hrotem diamantu je menší než u klasických válečkovacích nástrojů, je k vyvolání plastické deformace za studena potřebná menší síla.

V minulosti byly využívány pouze diamanty přírodního charakteru, v dnešní době jsou již upřednostňovány synteticky vyrobené diamanty. Vhodnějším typem jsou monokrystaly, jelikož tak docílíme vyšší životnosti hrotu a vyšší jakosti obrobeného povrchu, než v případě zvolení krystalu, k jehož spojení bylo využito kovového pojidla. Z důvodu, že diamant není pouze nejtvrdším krystalem, ale zároveň také nejlepším tepelným vodičem (pro představu je 10x lepším vodičem než měď), je nutno zajistit dostatečné chlazení nástroje, aby nedošlo k jeho trvalému poškození. Vzorová ukázka nástroje s diamantovým hrotem využívaného k obrobení různorodých vnitřních povrchů, vedoucího k vyhlazení a zpevnění povrchové vrstvy je z katalogu společnosti Baublies (viz. Obr. 31). [14]

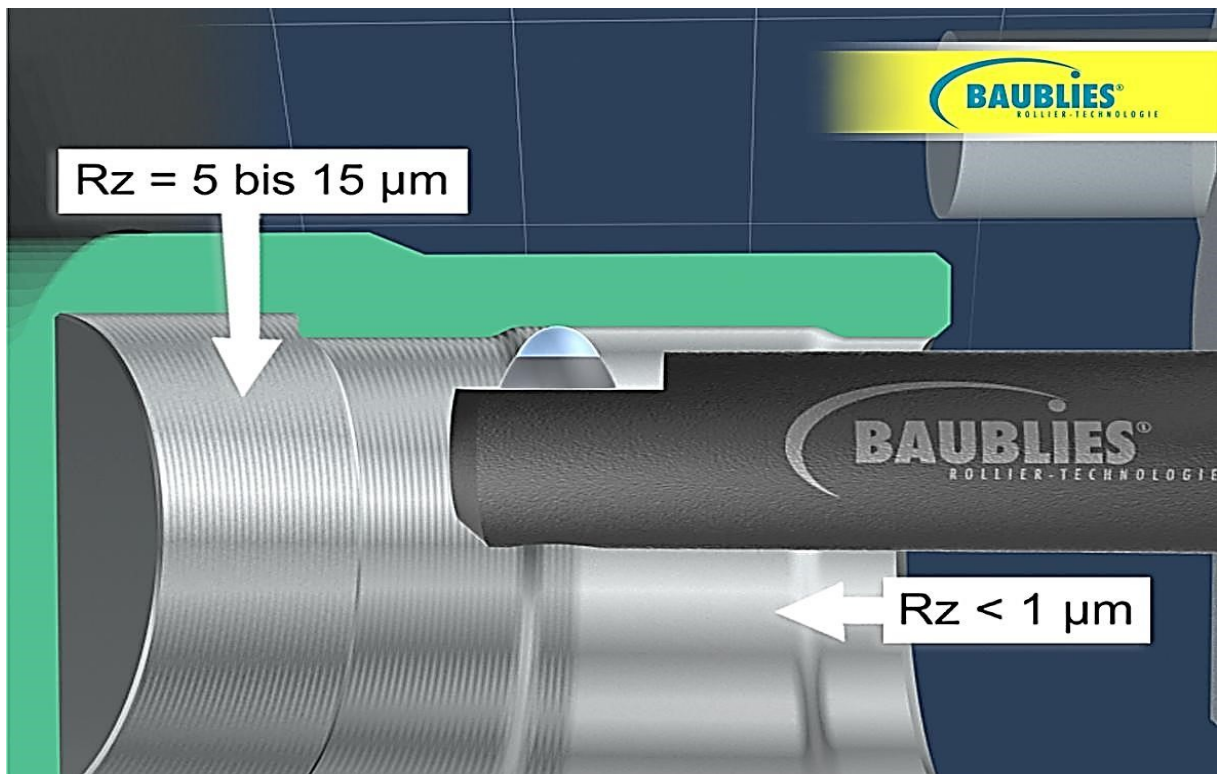


Obr. 31 Nástroj s odpruženým diamantovým hrotem pro opracování vnitřních otvorů[14]

Tab. 9 Parametry nástroje [14]

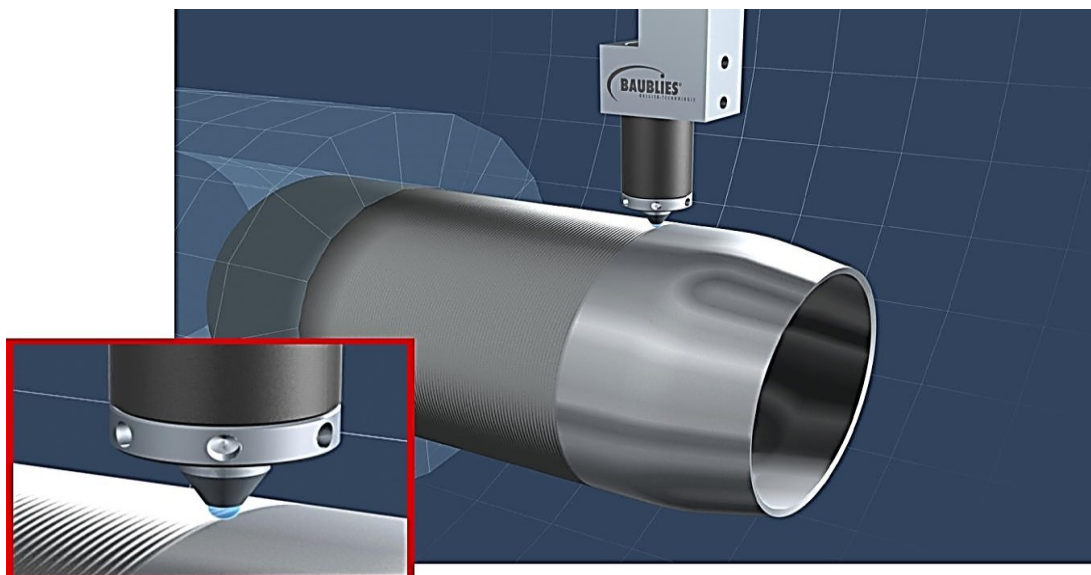
Obrábění	Vnitřní obrábění po vrtání
Přídavek na obrábění	Do 0,01 mm
Předpětí nástroje	Do 1 mm
Mazání	Emulze nebo olej, filtrace mazacího média (<math><40\mu\text{m}</math>) může zlepšit kvalitu obrobeneé plochy a životnost nástroje
Předchozí obrobění	Drsnost do 15 $\mu\text{m}$
Maximální tvrdost obrobku	65 HRC
Válečkováčí rychlost	Až do 100 m/min
Posuv	0,05 - 0,2 mm/ot
Standartní uchycení	Válcová stopka $\text{Ø}$ 20 - 25 mm





*Obr. 32 Vyhlazování vnitřní plochy pomocí nástroje s diamantovým hrotem [14]*

Nevyrábí se pouze diamantové nástroje určené k vnitřnímu vyhlazování povrchů. Na Obr. 33 je zobrazen diamantový nástroj při dokončování vnější plochy součásti. Technické parametry pro obrábění vnějších povrchů jsou uvedeny v Tab. 10.



*Obr. 33 Vyhlazování vnější plochy pomocí nástroje s diamantovým hrotem [14]*

Tab. 10 Technické parametry pro dokončování vnějších ploch diamantovým válečkovacím nástrojem [14]

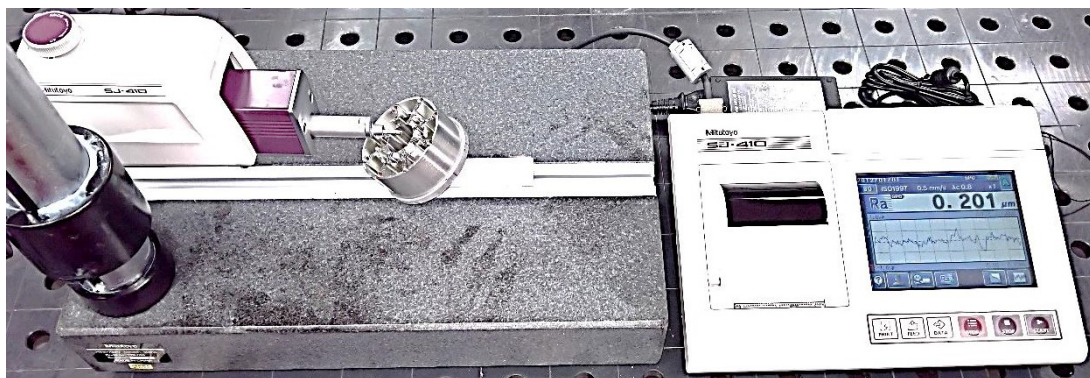
Obrábění	Obrábění hřídelí a vnějších obrysů
Přídavek na obrábění	Do 0,02 mm
Předpětí nástroje	Do 1 mm
Mazání	Emulze nebo olej, filtrace mazacího média (<40 $\mu$ m) může zlepšit kvalitu obrobeneé plochy a životnost nástroje
Předchozí obrobení	Drsnost do 15 $\mu$ m
Maximální tvrdost obrobku	65 HRC
Válečkovací rychlost	Až do 150 m/min
Posuv	0,05 - 0,2 mm/ot
Standartní uchycení	Válcová stopka $\varnothing$ 20 - 25 mm

#### Užitečné vlastnosti technologie válečkování s diamantovým hrotem:

- Povrchy mohou být vyhlazeny na drsnost  $R_a < 1 \mu\text{m}$ .
- Zvýšení povrchové vrstvy materiálu.
- Navýšení únavové meze.
- Zvýšená únosnost povrchu.
- Zvýšená rezistence dílu proti korozi a opotřebení.
- Zdravotně bezpečná technologie pro obsluhu, šetrná k životnímu prostředí - nehrozí riziko prašnosti. [14]

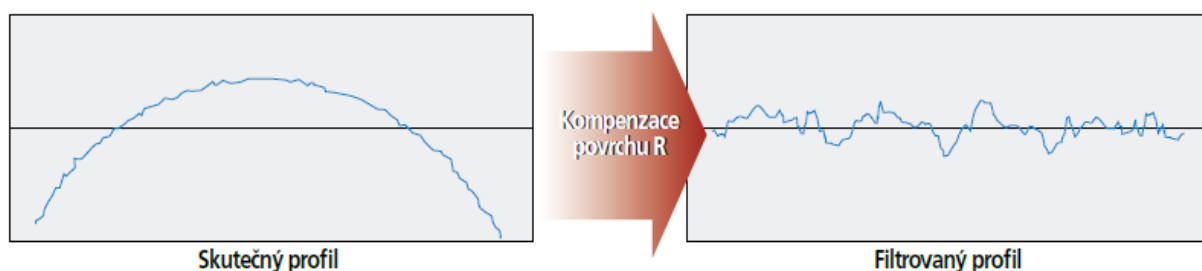
## 4.2 Návrh snížení drsností ploch světloometu SCX

Míra drsnosti je jedním z hlavních ukazatelů kvality obrobeneého povrchu součásti a je proto nezbytná její přesná identifikace. Pro určení drsnosti obrobeneých ploch světloometu bylo využito přístroje (drsnoměru) Mitutoyo SurfTest SJ – 411, jenž je zachycen na Obr. 34.



*Obr. 34 Drsnoměr Mitutoyo SurfTest SJ – 411*

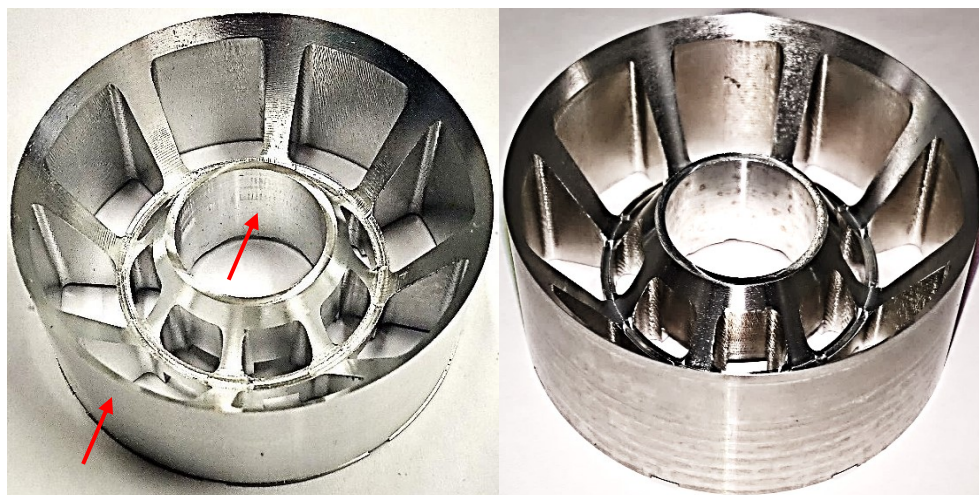
Velkou devízou zmíněného drsnoměru Mitutoyo SurfTest SJ – 411 je vlastnost kompenzace tvaru měřeného profilu. Méně vyspělé drsnoměry jsou schopny vyhodnocovat drsnost pouze na rovině. Nebylo by jimi tedy možno změřit složité plochy světloometu, které se vyznačují velkým tvarovým zakřivením povrchu. Drsnoměr Mitutoyo SurfTest SJ – 411 je schopen kompenzovat tvar plochy (viz Obr. 35) a zobrazit hodnoty drsnosti na zakřivené ploše (rádiusy, paraboly, hyperboly, elipsy, kužel a další).



*Obr. 35 Kompenzace zakřivení povrchu*

Měření drsnosti ploch bylo rozděleno do dvou částí. Prvním krokem bylo změření vnějších a vnitřních ploch světloometu. Druhým potom kontrola šikmých odrazových ploch. Při obrábění obou druhů ploch bylo použito dvou různých obráběcích nástrojů, při čemž v případě šikmých odrazových ploch bylo uplatněno různého směru obrábění.

Zmíněné měření drsnosti povrchu vnějších a vnitřních ploch světloometu SCX bylo praktikováno na dvou vzorcích, které jsou zachyceny na Obr. 36. Šipkami jsou označeny plochy, které se podrobily měření na přístroji Mitutoyo SurfTest SJ – 411. Naměřené hodnoty jsou zapsány v Tab. 11.



Obr. 36 Vnější a vnitřní plochy světlometu

Tab. 11 Drsnost povrchu vnější a vnitřní plochy světlometu

Drsnost povrchu [ $\mu\text{m}$ ]			
1. vzorek		2. vzorek	
Vnější	Vnitřní	Vnější	Vnitřní
0,199	0,262	0,182	0,192

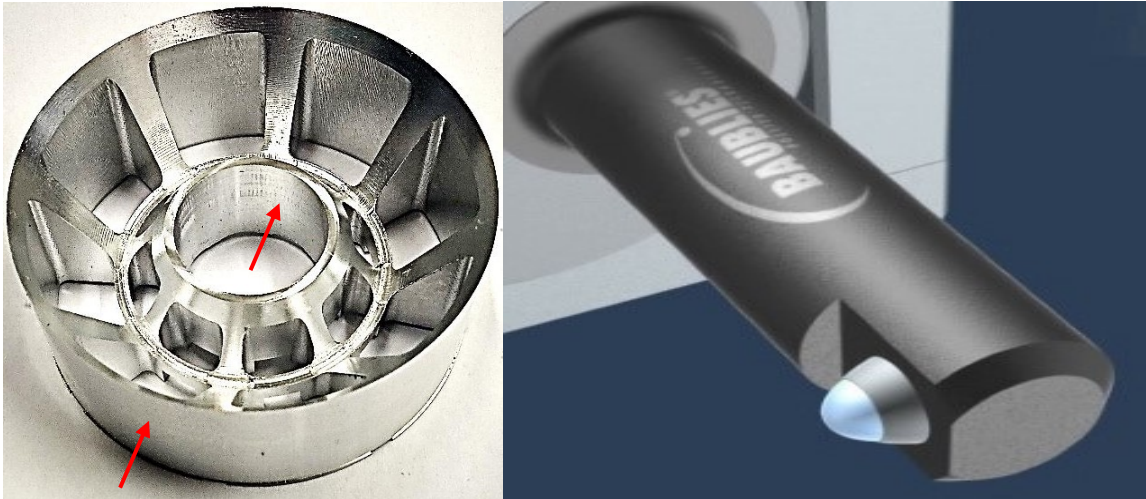
I přes to, že jsou světlometry pohledovou částí a drsnost nemá vliv na jejich funkčnost, je nutné drsnost snížit. Docílíme tak estetického zdokonalení vozu a neriskujeme snížený úsudek na celkové vozidlo, už jen z toho důvodu, že na automobilu SCX se bude vyskytovat osm kusů světlometů.

K požadovanému snížení navrhuji zvolit v předešlých částech práce zmíněnou technologii válečkování a mikrokování za studena pomocí pneumatického nástroje FORGE fix®P od společnosti POKOLM.

#### 4.2.1 Možnosti využití válečkových nástrojů s diamantovým hrotem

Vzhledem k tomu, že se zde jedná o vnitřní a vnější plochy bez tvarově náročných zakřivení, navrhnul bych využití diamantových válečkových nástrojů pro vnitřní a vnější povrchy, viz. Obr. 37, kterými nejen že docílíme nižších hodnot drsnosti (až  $0,1 \mu\text{m}$ ), ale také zlepšení povrchových vlastností součásti. Dochází ke ztuhnutí povrchové vrstvy, navýšení únavové meze, únosnosti povrchu, a také zvýšené rezistenci součásti proti korozi a opotřebení. Diamantové nástroje lze využívat k dokončování povrchů, jejichž drsnost nepřesáhla  $15 \mu\text{m}$  a tvrdost 60 HRC. Obě tyto podmínky jsou zdaleka splněny.



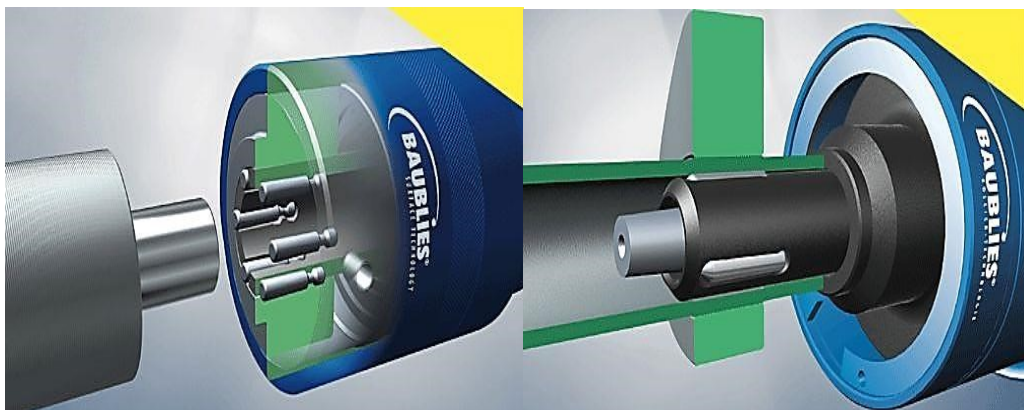


*Obr. 37 Nástroj s diamantovým hrotem určený k dokončování vnějších a vnitřních ploch*

Nástroje jsou vhodné k upnutí pouze na soustruh, jedná se o levné a hlavně univerzální nástroje, což znamená, že nejsou vázány k určitému průměru, ale lze je aplikovat na součásti různých rozměrů.

#### **4.2.2 Možnosti využití válečkování**

Diamantové nástroje nejsou jedinou možností jak dokončit vnitřní a vnější plochy světlometů (označeny šipkami). Vzhledem k tomu, že rámečkový materiál nedosahuje hranice tvrdosti pohybující se okolo 60 HRC, lze jako druhou variantu navrhnout klasické válečkovací nástroje, které lze využívat do tvrdosti 45 HRC. Nástroje můžeme vybavit 4 – 26 válečky dle průměru.



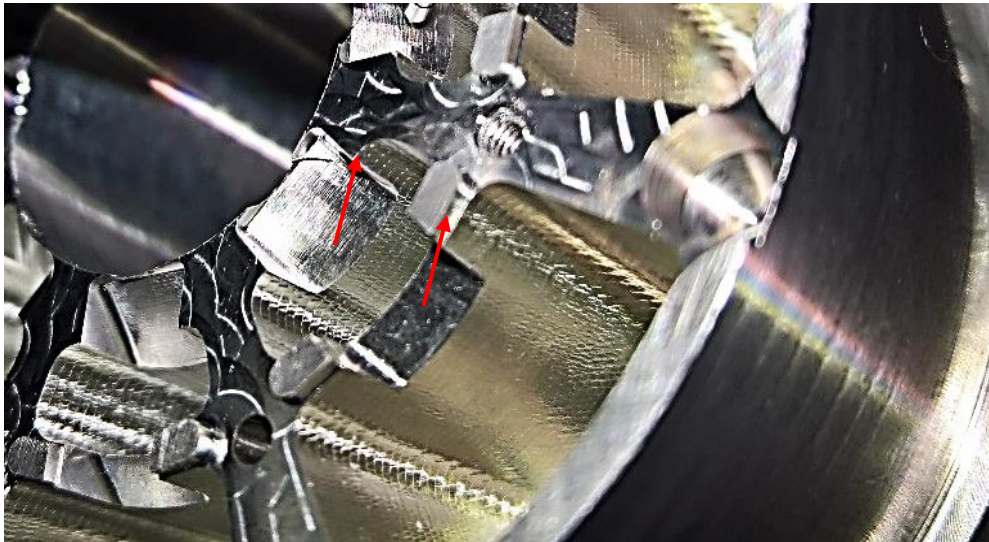
*Obr. 38 Válečkovací nástroje pro dokončování vnějších a vnitřních ploch [7]*

Válečkování vnějších ploch je ale spíše vhodné pro součásti menší průměru. S velikostí dílu totiž stoupá i velikost nástroje, což znamená zvýšené pořizovací náklady.

Ta samá charakteristika platí i v případě válečkových nástrojů pro dokončování vnitřních ploch. I zde platí neuniverzálnost nástrojů. To v překladu znamená, že pro různé otvory o různém průměru, je potřeba speciálního válečkovacího nástroje o daných rozměrech a tolerancích, což opět zvyšuje cenu výroby. Nástroje je možno upnout, na rozdíl od nástrojů s diamantovým hrotem, jak na CNC frézkách tak i soustruzích.

#### 4.2.3 Možnosti FORGE fix®P

Výše uvedené metody v kapitolách 4.2.1 a 4.2.2 nejsou vhodné k dokončování šikmých plošek, vyobrazených na Obr. 39 a zvýrazených červenými šipkami. Pro tyto optické plochy bych doporučil využití technologie mikrokování za studena a pneumatického nástroje FORGE fix®P. Tak zaručíme co nejpřesnější geometrii a co nejlepší jakost dokončeného povrchu. Výsledky měření původní drsností jsou zaznamenány v Tab. 12.



*Obr. 39 Měření drsnosti tvarových ploch*

Tab. 12 Výsledky měření drsnosti tvarových ploch

Drsnost povrchu [ $\mu\text{m}$ ]			
1. vzorek		2. vzorek	
Šikmé plošky ve směru	Šikmé plošky kolmo	Šikmé plošky ve směru	Šikmé plošky kolmo
0,434	0,227	0,238	0,415

Z důvodu rozdílných směrů frézování vyšly také dvě různé hodnoty drsností šikmých plošek. Komplikovanější ustanovení svétlometů do správné měřicí pozice si vyžádalo delší dobu měření.

V případě šikmých plošek je ideálním řešením volba mikrokování za studena s nástrojem FORGE fix®P. Za největší přednost této technologie považují možnost dokončování tvarově náročných povrchů a uchycení do běžných vřeten CNC frézek při využití standartní NC programů k hodnotám srovnatelných s válečkováním diamantovými nástroji, kde se drsnost opět blíží hodnotám okolo 0,1  $\mu\text{m}$ . Druhotným jevem, po snížené drsnosti, je vyleštění profilu a zhutnění povrchové vrstvy společně s navýšením otěruvzdornosti. Neméně kladnou vlastností této technologie také je, že nehrozí žádné tepelné ovlivnění součásti, které by mohlo vést k jejímu znehodnocení či dokonce trvalému zničení.



## 5 Zhodnocení a závěr

Hlavním cílem bylo navrhnout nekonvenční dokončovací metody pro povrchy světlometů SCX, u kterých potřebujeme dosáhnout vysoké jakosti povrchu jak z hlediska estetického, pohledového tak i jako odrazné optické plochy.

Na světlometu se vyskytují plochy různých charakterů, a proto bylo nutné navrhnout pro každý druh správnou technologii. V případě vnitřních a vnějších válcových ploch bych doporučil využití válečkovacích nástrojů s diamantovým hrotem. Lze jimi dosáhnout drsnosti ploch lepších než  $0,1\mu\text{m}$  oproti současným naměřeným hodnotám drsnosti, pohybujících se v intervalu  $0,182 - 0,262\mu\text{m}$ .

Válečkovací nástroje s diamantovým hrotem jsou vhodnějším typem ve srovnání s klasickými válečkovacími nástroji z důvodu své univerzálnosti. V případě klasických válečkovacích nástrojů pro dokončování vnějších a vnitřních povrchů, jsme limitováni průměry válcových součástí. Jednotlivé nástroje předurčené svými rozměry a tolerancemi, pro jaké průměry otvorů nebo vnějších ploch byly zkonstruovány. Tím se zvyšují náklady na dokončovací proces. Využívají se při výrobě větší série obrobků.

Drsnost světlometů SCX nebyla měřena pouze na vnějších a vnitřních válcových plochách, ale také u tvarově složitějších povrchů v těžko dostupných místech. Jednalo se o šikmé odrazové plochy světlometu. Ke snížení jejich drsností jsem navrhnul technologii mikrokování za studena s použitím nástroje FORGE fix®P, jenž je pro tento typ komplikovaněji členitých povrchů zkonstruován. Je možné jeho upnutí do běžných CNC frézek za využití 5-ti osého pohybu frézky a podobně jako u válečkování, i tato technologie kromě snížení drsnosti vede k úpravě vlastností povrchu. Přesněji ke zhutnění povrchové vrstvy a zvýšení lesku dílu povrchu odrazné plochy světlometu SCX.

Mezi velice perspektivní technologie obrábění patří ultrazvukové řezání. K jeho výhodám lze zařadit snížené množství vzniklého odpadu, zabránění vzniku třísek a dosažení vysoké přesnosti a kvality ořezaných dílů. Dále nehrozí deformace struktury, díky až 75% poklesu působících sil, kterých je potřeba k narušení materiálu. Především díky této vlastnosti se technologie využívá pro obrábění voštin, díky čemuž nehrozí deformace tvaru „včelích pláství“. Voštiny se jeví jako velice perspektivní materiál pro další generace kompozitních karoserií prototypů SCX.

## Seznam použité literatury.

- [1] VLACH, B., aj. *Technologie obrábění a montáží. 1. vyd.* Praha: SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1990. 464 s. ISBN 80-03-00143-9.
- [2] ŘASA, Jan, GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3 – 1.díl. 1. vydání.* Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-7183-207-3
- [3] ELUC. *Frézování* [online] [vid. 3. února 2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1226>
- [4] Milling. *Catalogue and technical manual 2010* [online] [vid. 28. března 2018]. Dostupné z: [https://www.pokolm.de/pbpp/katalog/P-V\\_Katalog\\_2010\\_en.pdf](https://www.pokolm.de/pbpp/katalog/P-V_Katalog_2010_en.pdf)
- [5] VAJSKEBR, Jiří, ŠPETA, Zdeněk. *Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním.* Praha: Nakladatelství technické literatury, 1984
- [6] Winter-servis.cz. *Válečkování povrchů* [online] [vid. 30. března 2018]. Dostupné z: [http://www.winter-servis.cz/index.php?page=ecoroll/valeckovani\\_povrchu](http://www.winter-servis.cz/index.php?page=ecoroll/valeckovani_povrchu)
- [7] Baublies.com. *Roller burnishing technology- essentials of the proces* [online] [vid. 30. března 2018]. Dostupné z: <http://www.baublies.com/technology.html#types-of-roller-burnishing-tools>
- [8] MM průmyslové spektrum *Nekonvenční technologie 18. 12. 2018.* [online] [vid. 4. dubna 2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonnencni-metody-obrabeni-3-dil.html>
- [9] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění.* Praha: Edič. České učení technické, 1989
- [10] Properties of Cutting Surface. *Ultrasonic Vibration-Assisted Cutting of Titanium Alloy* [online] [vid. 7. dubna 2018]. Dostupné z: [http://www.aspe.net/publications/Spring\\_2007/Spr07Ab/2082-Koshimizu.pdf](http://www.aspe.net/publications/Spring_2007/Spr07Ab/2082-Koshimizu.pdf)
- [11] Alucompozitepanels [online] [vid. 17. března 2018]. Dostupné z: <http://www.kompozity.com/102-hexalu>
- [12] Le creneau industrie. *CRENO 5 axis 2in1 machine* [online] [vid. 17. března 2018]. Dostupné z: <http://creneau.fr/index/fr/produits/2en1-5-axis>
- [13] POKOLM *FORGEfix® P – the pneumatic cold forging systém* [online] [vid. 2. dubna 2018 ]. Dostupné z: <https://www.pokolm.de/en/forgefix-p/>
- [14] albaprecision.cz. *diamantové nástroje* [online] [vid. 25. března 2018]. Dostupné z: <http://albaprecision.cz/cz/portal/produkty/baublies/diamantove-nastroje>

## Seznam obrázků

Obr. 1 Schématické znázornění frézování obvodem válcové frézy [3] .....	12
Obr. 2 Schématické znázornění frézování čelem čelní frézy [3] .....	13
Obr. 3 Kinematika sousledného frézování [3] .....	14
Obr. 4 Kinematika nesousledného frézování [3].....	14
Obr. 5 Názorná ukázka vybraných typů fréz [1].....	15
Obr. 6 Znázornění stopkové (vlevo) a nástrčné frézy (vpravo) [2].....	16
Obr. 7 Fotografie konzolové frézky vodorovné [3] .....	19
Obr. 8 Fotografie konzolové frézky svislé [3] .....	20
Obr. 9 Rovinná frézka [3] .....	21
Obr. 10 Schématický popis technologie [6] .....	25
Obr. 11 Válečkovací nástroj pro dokončování vnitřních otvorů[7] .....	26
Obr. 12 Schématické zakreslení principu ultrazvukového obrábění [8] .....	28
Obr. 13 Nákres přenosu ultrazvukových kmitů indukčními cívkami na vřeteno [10].....	30
Obr. 14 Závislost řezného odporu konvenční a ultrazvukové technologie řezání [10].....	31
Obr. 15 Porovnání špiček nástrojů - ultrazvuková (vlevo) a konvenční (vpravo) [10].....	31
Obr. 16 Sendvičový kompozit s hliníkovým jádrem [11].....	32
Obr. 17 Ultrasonická hlavice [12] .....	33
Obr. 18 Postup při prvotním hrubování profilu [12].....	33
Obr. 19 Fréza k hrubování [12].....	34
Obr. 20 Rotační disk připraven k upevnění do ultrazvukové hlavice [12].....	35
Obr. 21 Tvarové výřezy vyřezané ultrazvukovým rotačním diskem [12] .....	35
Obr. 22 Ultrasonický nůž [12].....	36
Obr. 23 Upnutý nástroj v ultrazvukové hlavici společně s detailem řezu [12] .....	36
Obr. 24 Konečná fáze voštinového jádra [12].....	37
Obr. 25 Popis procesu zpevňování materiálu a popis působení sil [5] .....	39
Obr. 26 Nosné profily povrchů [5].....	40
Obr. 27 Nástroj pro mikrokování za studena [13].....	43
Obr. 28 Okótované rozměry nástroje FORGE fix®P [13].....	43
Obr. 29 Pracovní nástroj uchycený robotem ve výrobě [13] .....	44
Obr. 30 Povrch po frézování (vlevo) a po zpracování za studena (vpravo) [13] .....	45
Obr. 31 Nástroj s odpruženým diamantovým hrotem pro opracování vnitřních otvorů[14] ...	47
Obr. 32 Vyhlazování vnitřní plochy pomocí nástroje s diamantovým hrotem [14] .....	48

Obr. 33 Vyhlazování vnější plochy pomocí nástroje s diamantovým hrotem [14].....	48
Obr. 34 Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ – 411.....	50
Obr. 35 Kompenzace zakřivení povrchu.....	50
Obr. 36 Vnější a vnitřní plochy světloometu .....	51
Obr. 37 Nástroj s diamantovým hrotem určený k dokončování vnějších a vnitřních ploch ....	52
Obr. 38 Válečkovací nástroje pro dokončování vnějších a vnitřních ploch [7] .....	52
Obr. 39 Měření drsnosti tvarových ploch.....	53