

UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2016

Bc. Lukáš Kudláč

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Optimalizace procesu obrábění u odlitků z vysokotlakého lití

Bc. Lukáš Kudláč

Diplomová práce

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Kudláč**
Osobní číslo: **D14581**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obory: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Dopravní prostředky: Silniční vozidla
Název tématu: **Optimalizace procesu obrábění u odlitků z vysokotlakého lití**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Základy obrábění
Metody ruční, strojní, nekonvenční metody
2. Navrhování experimentů
Metoda DOE
3. Vlastní experiment
4. Vyhodnocení mikrostruktur
5. Vyhodnocení podmínek obrábění

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího práce

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 60 stran textu a přílohy

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

Prof. Ing. Luděk Ptáček, CSc. a kolektiv; Nauka o materiálu 1. a 2. (CERM Brno)


KAUFMAN, J. GILBERT; ROOY, ELWIN L; Aluminum Alloy Castings - Properties, Processes, and Applications (ASM International)

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Švanda, Ph.D.


Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce: 20. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 2. prosince 2016


Ing. Michaela Ledvinová, Ph.D.
proděkanka pověřená řízením fakulty

L.S.


doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 22. listopadu 2016

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

Tato diplomová práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Olšanech dne 26.5. 2017

Bc. Lukáš Kudláč

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Pavlovi Švandovi, Ph.D., za cenné rady a trpělivé vedení při zpracování této diplomové práce, panu Ing. Davidovi Řepovi a panu Adamovi Semerádovi za pomoc při zpracování praktické části ve společnosti Ljunghäll s.r.o.. Velké poděkování patří samozřejmě i celé mé rodině a kamarádům za jejich pomoc a ochotu při zhotovení této práce.

Anotace:

Cílem práce bylo poukázat na jednotlivé druhy konvenčních a nekonvenčních způsobů obrábění. Především se jedná o vysvětlení jejich principu a ukázky jejich možného využití v praxi. Praktická část této práce se potom zaměřuje na optimalizaci procesu třískového obrábění u odlitků z Al slitin (dílů automatických převodovek, používaných u osobních automobilů), které se vyrábí technologií vysokotlakého lití. K samotné optimalizaci procesu je použita experimentální metoda DOE používající Taguchioho přístup, jejichž jednotlivé kroky jsou podrobně popsány. Takto získané optimální parametry procesu mohou být využity i v běžném provozu.

Klíčová slova:

Tříska, obrobek, obrábění, řezná rychlost

Title:

Machining process optimization for high pressure casting parts

Annotation:

The target of this work is to refer to particular kind of conventional and non-conventional machining methods. In particular, this is an explanation of the principle of machining methods and shows possible application in practice. Practical part of this work is focused on process optimization relating to machining process of pressure die castings made from light metal alloy (concerns the parts for personal car using automatic gearbox). This process optimization is implemented with using experimental method DOE, applying Taguchi methods, described step by step in detail. Such acquired optimal process parameters can be implemented into serial production.

Keywords:

Chip, work piece, machining, cutting speed

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek.....	11
Úvod.....	12
1. Proces obrábění.....	13
1.1. Konvenční metody obrábění.....	14
1.1.1. Ruční obrábění.....	15
Sekání.....	15
Řezání	16
Pilování	16
Zaškrabávání	17
1.1.2. Strojní obrábění.....	17
Broušení	18
Soustružení.....	19
Frézování	22
Vrtání a zahlubování	25
Protahování a protlačování	27
Hoblování, obrážení.....	28
1.2. Nekonvenční metody obrábění.....	30
1.2.1. Elektrotepelné procesy obrábění.....	30
Elektroerozivní metoda obrábění.....	31
Obrábění plazmou.....	32
Obrábění laserem	34
Obrábění elektronovým paprskem.....	37
1.2.2. Elektrochemické a chemické procesy obrábění.....	37
Elektrochemické obrábění	38
Chemické obrábění	38
1.2.3. Mechanické procesy obrábění	39
Ultrazvukové obrábění.....	40
Obrábění vodním paprskem.....	41
1.3. Přesné a dokončovací metody obrábění	42
1.3.1. Superfíníš	42
1.3.2. Honování.....	43

1.3.3.	Lapování	43
1.3.4.	Leštění.....	44
1.3.5.	Omílání	44
1.3.6.	Tryskání	45
2.	Tlakové lití.....	46
2.1.	Proces tlakového lití	46
2.2.	Slitiny hliníku	48
2.3.	Formy pro tlakové lití	48
2.4.	Vady odlitků	49
3.	DOE – Taguchicho přístup	54
3.1.	Plánování experimentů	58
3.2.	Navrhování experimentů	59
3.2.1.	Obráběný díl	61
3.2.2.	Mikrostruktura obráběného materiálu	62
3.3.	Provedení experimentů	67
3.4.	Analýza experimentů	68
3.4.1.	Výpočet hlavních účinků faktorů (stanovení optimální kombinace faktorů)	69
3.4.2.	Výpočet relativního podílu vlivu jednotlivých faktorů.....	71
3.4.3.	Odhad výsledku při optimálních podmínkách	74
3.5.	Ověřovací testy	75
3.5.1.	Vyhodnocení ověřovacích testů.....	75
4.	Závěr	77
	Seznam použité literatury.....	79

Seznam obrázků

Obr. 1 Řezné rychlosti [2].....	14
Obr. 2 Sekání [3].....	15
Obr. 3 Princip úběru třísky řezáním [4].....	16
Obr. 4 Typy seků [3].....	16
Obr. 5 Druhy škrabáku [5].....	17
Obr. 6 Princip broušení [1].....	18
Obr. 7 Brusné kotouče [6].....	19
Obr. 8 Pohyby při soustružení [7].....	20
Obr. 9 Popis soustružnického nože [7].....	20
Obr. 10 Geometrie soustružnického nože [7].....	21
Obr. 11 Obvodové frézování nesousledné [8].....	23
Obr. 12 Obvodové frézování sousledné [8].....	23
Obr. 13 Čelní frézování [8].....	24
Obr. 14 Frézovací hlava s vyměnitelnými noži [9].....	24
Obr. 15 Popis vrtáku.....	25
Obr. 16 Geometrie břitu šroubovitého vrtáku [10].....	25
Obr. 17 Válcový záhlubník [11].....	26
Obr. 18 Kuželový záhlubník bez vodícího čepu [12].....	26
Obr. 19 Způsob záběru zubů [13].....	27
Obr. 20 Princip protlačování a protahování [14].....	27
Obr. 21 Vnitřní protahovák [14].....	28
Obr. 22 Hoblovací nůž [15].....	29
Obr. 23 Obrážecí nůž [15].....	29
Obr. 24 Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [16].....	31
Obr. 25 Zařízení pro obrábění plazmovým paprskem [17].....	33
Obr. 26 Druhy plazmových hořáků [17].....	33
Obr. 27 Princip vzniku indukované emise [18].....	34
Obr. 28 Princip šroubovitého úběru materiálu [2].....	36
Obr. 29 Princip obrábění elektronovým paprskem [19].....	37
Obr. 30 Schéma zařízení pro elektrochemické obrábění vnějších ploch [20].....	38
Obr. 31 Princip chemického obrábění [21].....	39
Obr. 32 Princip obrábění ultrazvukem [22].....	40

Obr. 33 Zařízení pro obrábění vodním paprskem [23]	41
Obr. 34 Superfíniš [24]	42
Obr. 35 Honování stěn válce [25]	43
Obr. 36 Lapování rovinných obrobků [26]	43
Obr. 37 Leštění [2]	44
Obr. 38 Proces omílání v bubnové omílačce [27]	44
Obr. 39 Tryskací kabina [28]	45
Obr. 40 Zalisování roztaveného kovu do dutiny formy [29]	47
Obr. 41 Výpadek z formy odlitků 1733-00	47
Obr. 42 Tlaková licí forma odlitku 1733-00	49
Obr. 43 Puchýře	50
Obr. 44 Studené spoje	50
Obr. 45 Zadřeniny	51
Obr. 46 Vytržený materiál	51
Obr. 47 Trhliny	52
Obr. 48 Porezita na obrobené ploše	52
Obr. 49 Vměstky na obrobené ploše	53
Obr. 50 Břítová destička VBD VCMT 160408 BDA18 [31]	58
Obr. 51 Famar Pronto 6 [32]	60
Obr. 52 Obrobek 1733-00	61
Obr. 53 Schéma odběru vzorků pro metalografii	63
Obr. 54 Mikrostruktury odlitků; optický mikroskop; 500x	63
Obr. 55 Detail z elektronového mikroskopu u odlitku 1733-00	64
Obr. 56 Detail z elektronového mikroskopu u odlitku 1714-00	65
Obr. 57 Místo měření mikrotvrdosti	65
Obr. 58 Graf mikrotvrdosti odlitku 1733-00	66
Obr. 59 Graf mikrotvrdosti odlitku 1714-00	66

Seznam tabulek

Tab. 1 Ortogonální soustava L-8	56
Tab. 2 Návrh experimentů podle L-4.....	60
Tab. 3 Chemické složení slitiny EN AC-46000	61
Tab. 4 Popis jednotlivých experimentů	67
Tab. 5 Výsledky experimentů.....	69
Tab. 6 Hlavní účinky faktorů.....	70
Tab. 7 Výsledky pravděpodobného optimálního nastavení faktorů	70
Tab. 8 Výsledná tabulka ANOVA.....	73
Tab. 9 Popis ověřovacích testů	75
Tab. 10 Výsledky ověřovacích testů.....	75

Úvod

Stále se zvyšující požadavky na bezpečnost a také na ekonomičnost silničních vozidel, má za následek zvyšující se podíl součástí vyráběných z hliníkových slitin. Množství těchto dílů se v současné době pohybuje okolo 9 %. Při výrobě těchto dílů nejsou kladeny pouze požadavky na způsob jejich odlévání, ale i na proces jejich obrábění. Aby byl tento proces co nejefektivnější a zároveň i ekonomicky co nejméně náročný, je třeba tento proces správně nastavit (optimalizovat).

Prvopočátky obrábění jako takového nalezneme již v době kamenné, kdy si člověk začal vyrábět první primitivní nástroje. Tyto ručně vyráběné nástroje vytvářel vzájemným narážením dvou kamenů, čímž dosahoval přibližně požadovaného tvaru. Jednalo se především o výrobu zbraní a jednoduchých nástrojů, používaných v běžném životě. Postupně se tento proces dále zdokonaloval a rozšiřoval o nově vznikající obráběcí nástroje.

Postupem času začaly být kladeny čím dál vyšší nároky na výsledný produkt, především pak na kvalitu obrobeného povrchu, rozměrovou přesnost a na množství produkce. Tato skutečnost vedla v 18. století k zapojení strojů do obrábění, což mělo za následek celkové zjednodušení a hlavně ulehčení celého procesu a umožnila i vznik nových technologií.

Další důležitý zlom přišel v 19. století, kdy se kromě ručního řízení strojů začalo využívat i tzv. automatizace. Nejdříve se jednalo o řízení hydraulické, později o mechanické až po dnešní řízení plně elektronické. Tato změna umožnila výrobu tvarově složitějších součástí, při dosažení vyššího stupně přesnosti.

V současné době se moderní svět bez procesu obrábění téměř neobejde. Stopa po obrábění je vidět v mnoha průmyslových odvětvích, a proto je dnes strojírenství jedním z hlavních oborů. Z tohoto důvodu se tato práce zabývá přiblížením jednotlivých typů konvenčních a nekonvenčních způsobů obrábění, vysvětlením jejich principu a ukázkou jejich možného využití v praxi.

Praktická část této práce je potom zaměřena na optimalizaci délky životnosti břitové destičky soustružnického nože, používané k obrábění odlitků z vysokotlakého lití, které se dále používají v automatických převodovkách koncernu Volkswagen. Optimalizace jako taková spočívá v zajištění přesnosti obráběných dílů, prodloužení životnosti obráběcích nástrojů a ve snížení finančních nákladů. K tomuto účelu se využívá tzv. zkrácených experimentálních zkoušek. Mezi hlavní zástupce těchto zkoušek patří metoda DOE, která nachází široké uplatnění v mnoha oborech.

1. Proces obrábění

Pod pojmem obrábění máme na mysli technologický proces, kterým vytváříme požadovaný tvar obráběného předmětu, při daném stupni přesnosti rozměrů, a to odebráním opracovávaného materiálu za pomoci mechanických, elektrických nebo chemických účinků případně jejich kombinací. Touto skutečností se proces obrábění liší od jiných technologií, jako je například tváření nebo odlévání.

Pro lepší pochopení celé problematiky je třeba vysvětlit několik základních pojmů:

- **Obrobek** – obráběný předmět
- **Obráběná plocha** – část plochy obrobku, ze které je odebírán materiál
- **Obrobená plocha** – plocha obrobku, vzniklá obráběním
- **Plocha řezu** – plocha, která vzniká bezprostředně za břitem nástroje
- **Přídavek** – je vrstva materiálu, která je postupně z povrchu obrobku odstraňována ve formě třísek tak, aby vzniklá součást odpovídala výkresovým rozměrům.
- **Tříška** – odebíraná a deformovaná vrstva materiálu obrobku

Základní dělení obráběcích metod je na metody konvenční a nekonvenční. U konvenčních metod je jasně definovaná geometrie nástroje a většinou i břitu. Mechanickým působením nástroje na obráběný materiál, dochází ke vzniku klasické třísky. U metod nekonvenčních dochází k úběru materiálu v důsledku působení fyzikálních či chemických sil a geometrie nástroje nebývá mnohdy jasně definovaná (břit není na nástroji vytvořen). U nekonvenčních metod proto většinou nevznikají jasně definované třísky.

Výhodou konvenčních metod obrábění, je snadná analýza procesů probíhajících při úběru materiálu. Volbou řezných materiálů, geometrií nástroje a řezných podmínek, je možno výrazně ovlivňovat množství materiálu odebraného za jednotku času. Metody nekonvenční pak mají většinou srovnatelný úběr materiálu za jednotku času pro materiály s různými mechanickými vlastnostmi a změna nastavení obráběcích podmínek nemá široké rozmezí možných hodnot.

Proto je v případě konvenčních metod obrábění možné volbou vhodných parametrů značně změnit produktivitu celého procesu.

1.1. Konvenční metody obrábění

Konvenční metody obrábění jsou procesy mechanického oddělování beztvárných částic materiálu (třísek), oddělujících se při kontaktu s jedním nebo několika břity nástroje. K tomu je třeba zajistit, aby se nástroj a obrobek vůči sobě pohybovaly řezným pohybem, který může vykonávat nástroj nebo sám obrobek. Řezný pohyb se dělí dvou složek:

1. Hlavní řezný pohyb

Je relativní složkou řezného pohybu určenou řeznou rychlostí, kterou může vykonávat nástroj, nebo obrobek. Pohyb může být kruhový (při vrtání, soustružení, frézování, broušení), přímočarý (při obrážení) nebo složený.

2. Vedlejší řezný pohyb

Skládá se zpravidla ze dvou dalších pohybů, které přímo určují velikost odebírané třísky:

- **Posuv s**

Je chápán jako posuv nástroje nebo obrobku, který společně s rychlostí realizuje obrábění (kolmý na směr rychlosti).

- **Přísuv t**

Přísuvem je popsán pohyb mezi nástrojem a obrobkem, který určuje šířku odebírané třísky (vzdálenost mezi nástrojem a obrobkem). Tento pohyb není složkou řezného pohybu.

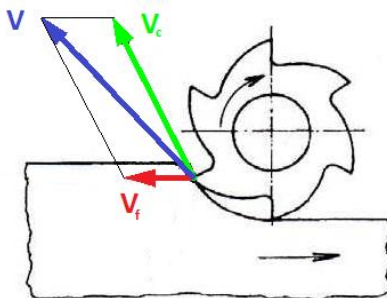
Výsledná řezná rychlost je totožná s rychlostí řezného pohybu a získá se vektorovým součtem jednotlivých složek rychlostí:

1. Řezná rychlost v_c

Je okamžitá rychlost hlavního řezného pohybu uvažovaného bodu ostří vůči obrobku.

2. Posuvná rychlost v_f

Je okamžitá rychlost posuvného pohybu v uvažovaném bodě ostří vůči obrobku.



Obr. 1 Řezné rychlosti [2]

Jelikož jsou třísky materiálu odebírány břitem nástroje, je hlavní snahou splnit čtyři základní požadavky:

- Přiměřenou drsnost obrobene plochy
- Doba pro opracování by měla být co nejkratší
- Vynaložené síly na nástroj co nejmenší
- Životnost břitu nástroje co nejdelší

Ne vždy však lze vyhovět všem čtyřem požadavkům zároveň, a proto se mezi nimi volí určitý kompromis za pomoci různých metod obrábění.

1.1.1. Ruční obrábění

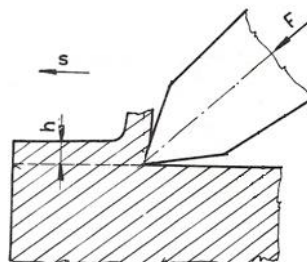
Při ručním třískovém obrábění se obrobky opracovávají pomocí jednoduchých nástrojů, mezi které například patří sekáč, pilník a škrabák. Jako zdroj rezného pohybu se zde využívá lidské obsluhy.

Hlavní nevýhodou těchto metod je časová náročnost a do určité míry i nepřesnost, která je závislá na manuální zručnosti obsluhy. I přesto však tento druh opracování nachází široké uplatnění v podobě dokončovacích prací ve velkoobjemové nebo maloobjemové výrobě.

Sekání

Sekání je jedním z nejstarších způsobů obrábění materiálu. Celý proces je velmi podobný stříhání, pouze místo statického působení síly se zde uplatňuje dynamické působení síly, které vzniká úderem kladiva do nástroje (sekáče). Sekáč pod účinkem rezných ran nejdříve nařízne materiál jako nůžky, dalším stlačováním pak dojde k porušení jeho soudržnosti a k následnému prasknutí.

Tento způsob opracování se nejčastěji používá u hrubšího opracování materiálu, opravách odlitek, ale také při vysekávání drážek a děr u slabších materiálů.



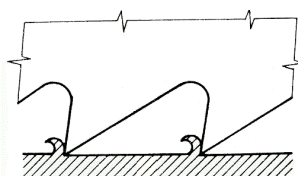
Obr. 2 Sekání [3]

Řezání

Řezání je jeden z nejběžnějších způsobů třískového obrábění, využívající mnohozubého nástroje s malou šířkou řezu a geometricky určenými pilovými zuby.

Hlavní reznou částí je pilový list, skládající se z mnoha za sebou ležících břitů sekáčovitěho tvaru, které postupně přicházejí do styku s opracovávaným materiálem a oddělují malé třísky. Tyto třísky zachycují zubové mezery a odvádějí je ven ze spáry. Při řezání dochází ke tření mezi materiálem a nástrojem, což vede k jejich zahřívání. Tomu lze z části zamezit přivedením rezné kapaliny, která plní funkci mazání a tím eliminuje nebezpečí vzniku vzpříčení pilového listu, což je částečně podchyceno i samotným „zvlněním“ zubů.

Geometrie pilového listu je přímo závislá na druhu rezných spár a na tvrdosti materiálu. Například u dlouhých rezných spár měkkého materiálu (hliníku), dochází ke vzniku velkého množství třísek, proto se zde uplatňuje pilový list s velkou roztečí zubů, aby byl zajištěn dostatek místa pro vzniklé třísky.

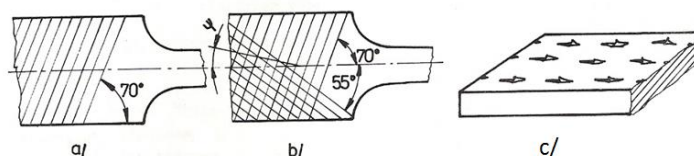


Obr. 3 Princip úběru třísky řezáním [4]

Pilování

Pilování je typ třískového obrábění s přímočaře opakovaným rezným pohybem, pomocí mnohozubého nástroje s geometricky určitými reznými klíny. Nástrojem neboli pilníkem se odebírá velké množství malých třísek a dle provedení jeho rezné části (druhu seku), která je přímo závislá na druhu obráběného materiálu, ho lze dělit na:

- Pilníky s jednoduchým sekem – pro měkké kovy
- Pilníky s křížovým sekem – pro tvrdé kovy
- Pilníky s rašplovým sekem – pro dřevo nebo plastické hmoty



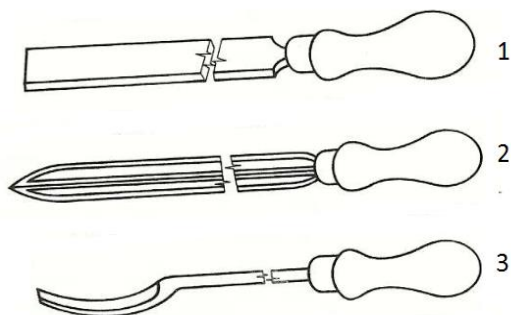
Obr. 4 Typy seků [3]

Tento způsob opracování má velké uplatnění především v dokončovacích operacích a při ručních opravách součástí.

Zaškrabávání

Zaškrabávání je způsob konečného ručního obrábění kovových součástí, pomocí kterého dosahujeme hladkého a nerýhovaného povrchu materiálu. Běžně se využívá k odstranění nežádoucích špon po předchozím opracování anebo k získání vodících či kluzných ploch.

Jako nástroj se používají tzv. škrabáky, které se nejčastěji vyrábí z rychlořezné oceli, popřípadě s řeznou částí ze slinutých karbidů.



1 – Škrabák plochý; 2 – Škrabák trojhranný; 3 – Škrabák lžícový

Obr. 5 Druhy škrabáku [5]

Tento způsob opracování však vyžaduje velké množství času, ale i značnou manuální zručnost, což vede k vyšší ceně. Z tohoto důvodu se často zaškrabávání v rámci velkého množství nahrazuje broušením.

1.1.2. Strojní obrábění

Je druh třískového obrábění, při kterém se pomocí břitu řezného nástroje odebírají z obrobku částice materiálu ve tvaru třísek. Řezný pohyb je vyvozován pomocí strojních zařízení, která jsou k tomuto účelu přímo konstruována. Tímto způsobem se nejčastěji obrábějí rovinné, válcové, kuželové, nebo tvarové plochy. V současné době se stále více rozšiřuje využití číslicově řízených obráběcích strojů. V důsledku toho je možné vyrábět tvarově složitější výrobky. Číslicové řízení navíc umožňuje velmi dobré řízení obráběcího procesu. Tím se může dosáhnout optimálních parametrů obráběcího procesu jak z pohledu nástroje, tak i obrobku.

Hlavní výhoda strojního obrábění spočívá v tvarové a rozměrové přesnosti obrobekých součástí, které lze oproti ručnímu obrábění dosáhnout. Další výhodou je možná automatizace celého procesu v sériové výrobě a tím spojená zvýšená produktivita práce.

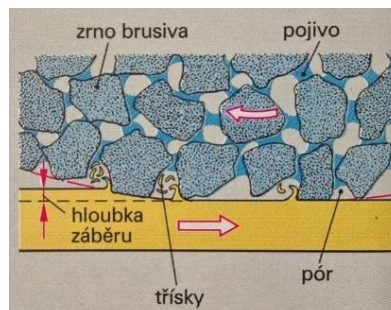
Broušení

Broušení je druh třískového obrábění pomocí nástroje s geometricky neurčitými břity. Nástroje jsou tvořeny směsí zrn brusiva a pojiva do vhodného tvaru, struktury a tvrdosti. Jako brusivo se používají tvrdé, houževnaté a ostrohranné krystalické látky, kterými lze brousit jiné měkké materiály. Mezi nejčastěji používané druhy brusiva patří oxidy hliníku, nazývané též jako korundy nebo karbidy křemíku.

Pojiva vzájemně spojují jednotlivá brusná zrna a zároveň mají za úkol umožnit uvolnění opotřebovaných zrn tak, aby se do kontaktu s obráběnou plochou dostala zrna nová s ostrými břity. Čas uvolnění jednotlivých zrn je závislý na typu broušeného materiálu. U měkkých materiálů je třeba držet zrna delší dobu, naopak u tvrdých materiálů musí k uvolnění dojít rychleji.

Hlavními charakteristickými znaky tohoto druhu obrábění je:

- Nepravidelný úběr materiálu z důvodu rozdílné geometrie zrn.
- Schopnost přenosu malých řezných sil vlivem slabého upevnění zrn v pojivu.
- Vznik velkého množství tepla a s tím spojená nutnost chlazení obrobku.
- Postupná ztráta řezné schopnosti nástroje, způsobená otupením ostří jednotlivých zrn a zanášením pórů nástroje třískami.



Obr. 6 Princip broušení [1]

Důležitým parametrem pro výslednou drsnost opracované plochy je tzv. zrnitost brusiva. Jedná se o číselnou hodnotu, která odpovídá počtu ok síta, připadající na délku jednoho palce, kterými byla zrna proseta.

Aby se brusný nástroj co nejlépe přizpůsobil obráběnému materiálu, používají se různé typy brusných zrn a pojiv. Rozhodující vliv zde hraje zejména tvrdost a struktura brusného nástroje.

- **Tvrdost brusného nástroje**

Jinak řečeno soudržnost kotouče nebo odpor proti vylamování zrn. Brusné kotouče se označují podle stupně tvrdosti písmeny A až Z.

- **Struktura brusného nástroje**

Definuje kvantitativní poměr objemu brusných zrn, pojiva a pórů v kotouči. Čím vyšší toto číslo je, tím vyšší je pórovitost a větší vzdálenost jednotlivých zrn mezi sebou.

Všeobecně platí, že čím větší objem odebraných třísek je, tím pórovitější musí být struktura kotouče.

Při obrábění broušením se dosahuje velké rozměrové a tvarové přesnosti při dobré jakosti povrchu. Tvary jednotlivých brusných nástrojů jsou normalizovány a existují v různých provedení. Mezi ty hlavní patří brusné kotouče, lamelové kotouče, brusná tělíska, brusné segmenty a brusná plátna.



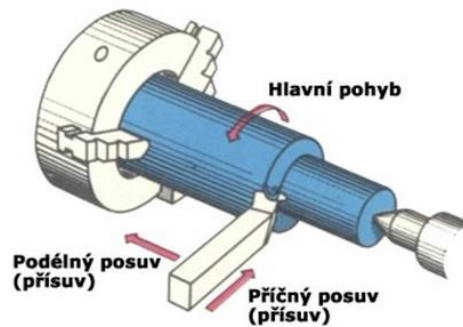
Obr. 7 Brusné kotouče [6]

Soustružení

Soustružení je jedním z nejrozšířenějších způsobů strojního obrábění za pomoci jednobřitého, geometricky určitého nástroje. Tento druh obrábění se uplatňuje ve 30 % až 40 % z celkového objemu strojního obrábění.

Ve většině případů koná hlavní rotační pohyb obrobek. Vedlejší pohyb je potom realizován nástrojem, a to buď ve směru osy rotace obrobku (posuv), nebo ve směru kolmém na tuto osu (přísuv). Pohybuje-li se nástroj podélně vůči otáčejícímu se obrobku, vzniká na jeho povrchu

stopa po obrábění ve tvaru šroubovice. Je-li pohyb nástroje v příčném směru, je vzniklá stopa ve tvaru Archimédovi spirály.



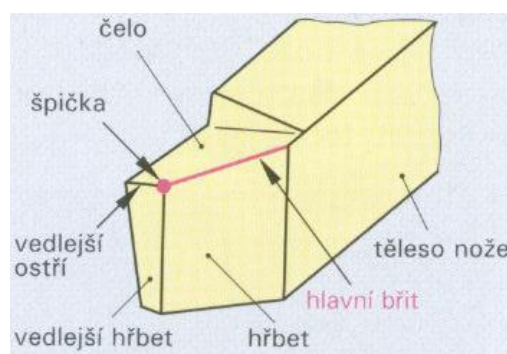
Obr. 8 Pohyby při soustružení [7]

Soustružením se nejčastěji obrábí vnější a vnitřní válcové, kuželové nebo tvarové plochy. V praxi se potom rozlišují čtyři základní druhy soustružnických prací:

- **Podélné soustružení**
- **Čelní soustružení**
- **Tvarové soustružení**
- **Kopírovací soustružení**

Současně existují i možné kombinace zmíněných soustružnických prací. Na soustružích lze rovněž vrtat, řezat závit, vystružovat, či soustružit kulovité nebo rovinné plochy.

Jako nástroj se u tohoto druhu obrábění používá tzv. soustružnický nůž. Tento nůž odpovídá základním tvarem tvaru klínu, jehož hlavním úkolem je oddělování třísek z obráběné plochy obrobku. Důležitou roli zde hraje tvar a velikost hlavního a vedlejšího ostří. Hlavní ostří má za úkol zajistit vznik odebírané třísky a s vedlejším ostřím vytvářejí zpravidla zaoblenou špičku, která ovlivňuje hloubku vznikající stopy po obrábění. Velikost takto odebrané třísky je potom dána přísuvem nástroje k obrobku.



Obr. 9 Popis soustružnického nože [7]

Jelikož jsou všechny soustružnické nože namáhány ohybovým momentem, lze jejich průřez přibližně stanovit výpočtem. Přibližně proto, že se neuvažuje se zatížením složkami řezného odporu, jeho postupným nárůstem při opotřebení nástroje a změnou řezných podmínek. Délka nože se volí dle způsobu upnutí nástroje nebo podle normy.

Aby byly zajištěny správné řezné podmínky, je třeba zvolit správnou geometrii břitu nože, která se nejčastěji určuje podle technologických tabulek, nebo podle doporučení jednotlivých výrobců, udávaných v jejich katalozích. Jedná se především o následující úhly:

- **Úhel hřbetu α**

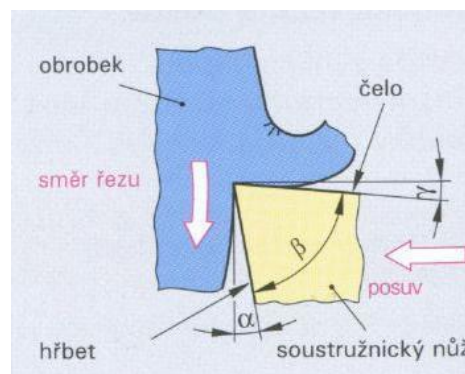
Je úhel svírající tečnou obráběné plochy a hlavním hřbetem nože. Má vliv na velikost vzniklého tření mezi hlavním hřbetem a řeznou plochou. Čím větší tento úhel je, tím je tření mezi oběma plochami menší. Velikost úhlu nejčastěji bývá od 4° do 10° .

- **Úhel břitu β**

Je úhel mezi čelem nože a hlavním hřbetem. Velikost tohoto úhlu má vliv na odpor, který je kladen materiálem obrobku při obrábění. Všeobecně platí, že čím menší úhel břitu je, tím lépe vniká břit nástroje do obrobku. Na druhou stranu u nástrojů s příliš malým úhlem břitu dochází k rychlému otupení a ztrátě řezné schopnosti. Z tohoto důvodu se dle druhu obráběného materiálu volí úhel břitu nejčastěji v rozmezí od 45° až do 90° .

- **Úhel čela γ**

Je úhel, který svírá čelo nože a rovina procházející hlavním ostřím, která je zároveň kolmá k řezné ploše obrobku. Jeho velikost ovlivňuje směr odváděné třísky. Čím větší tento úhel je, tím snadněji se odvádí tříška a nástroj se méně zahřívá. Velikost úhlu je však omezena pevností břitu nástroje, neboť s rostoucím úhlem pevnost nástroje klesá. Z tohoto důvodu se u obrábění pevných a tvrdých materiálů volí úhel břitu buď nulový, nebo v rozmezí několika stupňů.



Obr. 10 Geometrie soustružnického nože [7]

Soustružnické nože mohou být vyrobeny z nástrojové oceli jako celistvé, nebo jako sestava držáku z konstrukční oceli a břitové destičky. Tyto destičky jsou k držáku buď připájeny, nebo spojeny mechanickým způsobem. V současné době se nejčastěji používají břitové destičky ze slinutých karbidů se 3 až 6 řeznými hranami, spojených mechanickým způsobem. Po otupení jednoho ostří se destička jednoduše pootočí a pracovní polohu zaujme ostří nové. Tím odpadá potřeba častého broušení.

Rozdělení soustružnických nožů lze provést z různých hledisek. Mezi ty základní způsoby dělení patří:

- **Podle tvaru obráběné plochy** – vnější, vnitřní
- **Podle charakteru obrábění** – hrubovací, hladící
- **Podle způsobu obrábění** – ubírací, zapichovací a upichovací, vyvrtávací, tvarové
- **Podle tvaru tělesa nože** – přímé, ohnuté, prohnuté, osazené
- **Podle orientace ostří** – pravé, levé, souměrné
- **Podle druhu obráběcího stroje** – revolverové, soustružnické, automatové

Mezi nejběžnějšího zástupce strojních zařízení určených k tomuto způsobu obrábění patří soustruh hrotový. Podle způsobu obrábění však existují i další varianty těchto zařízení, mezi které patří soustruh čelní, revolverový, svislý, který může být i jako automatický nebo číslicově řízený (CNC stroje).

Soustružení se v dnešní době stalo nedílnou součástí výroby v mnoha odvětvích průmyslu. Je to především z důvodu stále se zvyšujících požadavků na rozměrovou a tvarovou přesnost.

Frézování

Frézování je jednou z dalších běžně používaných metod třískového obrábění, sloužící k výrobě rovinných a zakřivených ploch, drážek, závitů a ozubených kol pomocí nástroje s geometricky určenými břity. Hlavním řezným pohybem je pohyb rotační, který koná nástroj neboli fréza. Vedlejším pohybem je potom posuv nebo přísuv konaný obrobkem.

Podle vzájemné polohy frézy vůči obrobku, rozlišujeme metodu frézování na obvodové a čelní.

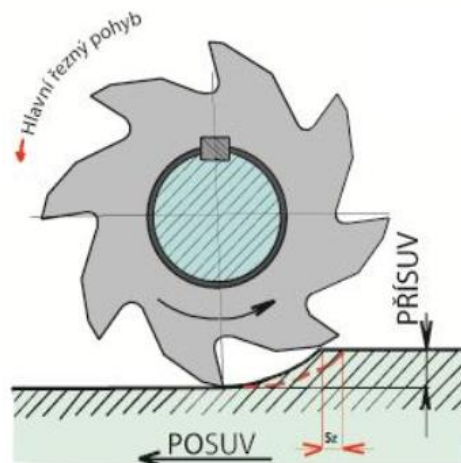
- **Obvodové frézování**

Osa frézy leží rovnoběžně s obráběnou plochou. Zatížení frézy je nerovnoměrné, což může vést ke vzniku vibrací a vlnitého povrchu.

Obvodové frézování se dle směru posuvu obrobku a otáčivého pohybu frézy dělí na dva následující druhy:

1. Frézování nesousledné

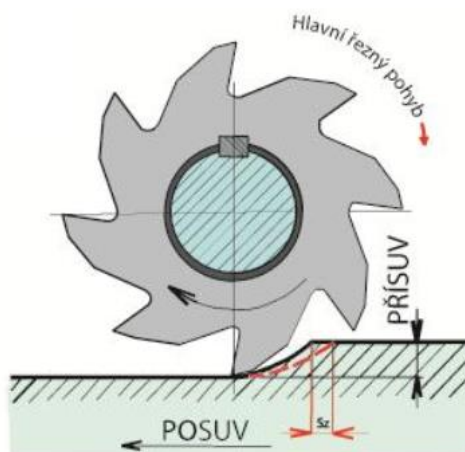
Posuv obrobku probíhá proti směru otáčení nástroje. Dochází ke klidnému záběru frézy, avšak na obrobene ploše zůstávají stopy po obrábění.



Obr. 11 Obvodové frézování nesousledné [8]

2. Frézování sousledné

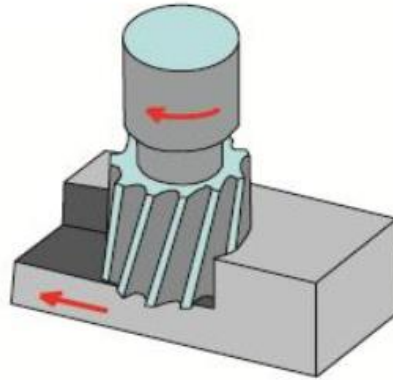
Posuv obrobku a otáčivý pohyb nástroje mají stejným směr. Dochází k menšímu namáhání břitů a výsledný povrch je hladší. Nevýhodou je vznik silných rázů při záběru břitů, čehož lze odstranit použitím frézy se šikmými zuby.



Obr. 12 Obvodové frézování sousledné [8]

- **Čelní frézování**

U tohoto způsobu frézování leží osa nástroje kolmo k opracovávané ploše, což umožňuje záběr více zubů najednou. Zatížení frézy je v tomto případě rovnoměrné i při použití větší rezné rychlosti. Dosahuje se vyšší kvality obráběného povrchu a nejčastěji se využívá k obrábění rovinných ploch.



Obr. 13 Čelní frézování [8]

Frézovací nástroje se nejčastěji vyrábějí z nástrojové oceli, případně jako kombinace s břity ze slinutých karbidů. Tvary a velikosti běžně používaných fréz jsou normalizované, avšak zvláštní skupinu tvoří tzv. frézovací hlavy s vyměnitelnými noži nebo plátky, které se vyrábí i na zakázku.



Obr. 14 Frézovací hlava s vyměnitelnými noži [9]

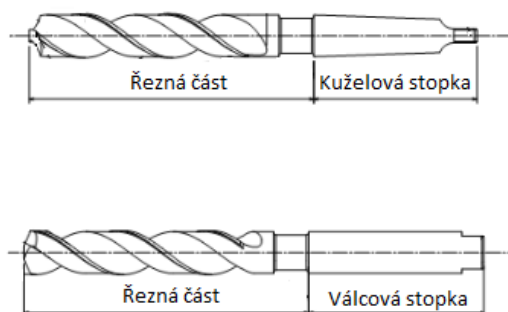
Strojní zařízení pro tento druh obrábění nazýváme frézky. Můžeme je dělit podle typu konstrukce (konzolové, stolní, rovinné a speciální) nebo podle polohy vřetene (vodorovné a svislé). Všeobecně platí, že vhodnost použitého zařízení závisí vždy na druhu obráběné plochy.

Vrtání a zahlubování

Vrtání

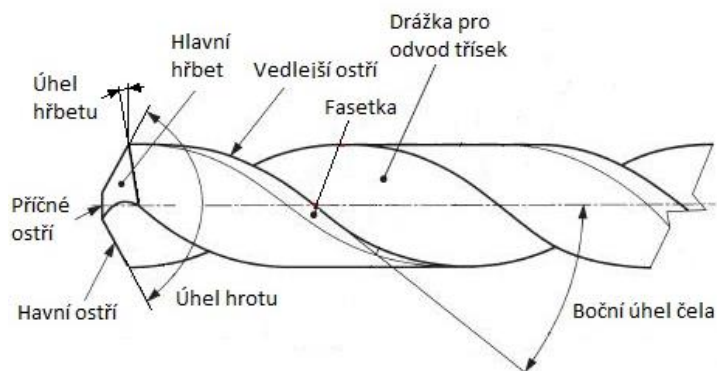
Pojmem vrtání označujeme druh strojního třískového obrábění, pomocí nástroje s geometricky stanovenými břity, určeného pro výrobu válcových děr. Nástrojem je vrták, který vykonává dva druhy pohybů. Hlavní pohyb, který vrták většinou vykonává je pohyb rotační. Vedlejší pohyb potom zajišťuje jeho posuv v axiálním směru proti obrobku tak, aby docházelo ke vzniku třísky. Řezná rychlost vrtáku je závislá na materiálu břitu a na materiálu obrobku. Posuv se potom odvíjí od průměru vrtáku, druhu obráběného materiálu a metodě vrtání.

Existují různé varianty nástrojů, podle druhu obráběného materiálu. Mezi ty hlavní patří vrták dělový, kopinatý, středící, korunový, kruhostředný nebo nejčastěji používaný vrták šroubový. Vrták šroubový se skládá ze dvou hlavních částí. První je stopka, sloužící k upnutí vrtáku a druhou je řezná část.



Obr. 15 Popis vrtáku

Hlavním charakteristickým znakem každého šroubovitého vrtáku je jeho geometrie řezné části schematicky znázorněná na Obr. 16.



Obr. 16 Geometrie břitu šroubovitého vrtáku [10]

Jak již bylo naznačeno, upnutí vrtáku se realizuje prostřednictvím jeho stopky. Vrtáky s válcovou stopkou se většinou upínají do tříčelistových sklíčidel, která jsou připevněna do

vřetene vrtačky. Naopak vrtáky s kuželovou stopkou se upínají přímo do vřetene nebo do pomocných redukčních pouzder.

Dle požadovaného průměru a přesnosti vrtaného otvoru se používají vrtačky ruční (od 2 mm do 25 mm) nebo strojní. Hlavní nevýhoda ručních vrtaček spočívá v nižší přesnosti vzniklého otvoru, proto se pro přesnější a efektivnější vrtání používají vrtačky strojní, kde lze zajistit přesný posuv vřetene.

Zahlubování

Proces zahlubování je následné obrobení vyvrtaného otvoru. Jedná se především o zarovnání čela otvoru, vytvoření zahloubení pro zapuštěné hlavy šroubů a podobně.

V praxi se běžně používají dva hlavní typy záhlubníků:

- **Záhlubníky válcové**

Jsou několikabřité nástroje s pevným nebo vyměnitelným vodícím čepem, který vede nástroj otvorem. Používají se pro válcové zahloubení hlav šroubů nebo pro zarovnání dosedacích ploch.



Obr. 17 Válcový záhlubník [11]

- **Záhlubníky kuželové**

Jsou většinou vícebřité nástroje s vodícím čepem, ale i bez něj. Tento druh záhlubníků se nejčastěji používá k odstranění otřepů děr nebo k vytvoření kuželových zahloubení pro hlavy šroubů a nýtů. Jejich vrcholový úhel je normovaný dle způsobu použití:

- 60° pro odstranění otřepů na hranách otvorů
- 75° pro hlavy nýtů
- 90° zkosení hran pro vnitřní závity a pro zápustné šrouby
- 120° pro nýty do plechu



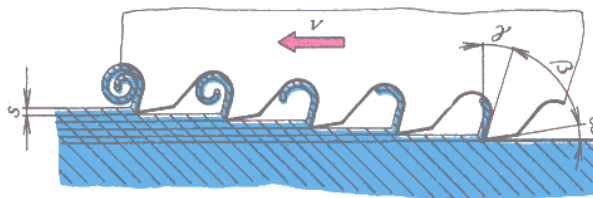
Obr. 18 Kuželový záhlubník bez vodícího čepu [12]

Protahování a protlačování

Protahování nebo protlačování je druh obrábění vícebřitým nástrojem, určeným k opracování vnějších nebo vnitřních ploch. Obě metody jsou velmi produktivní, neboť k obrobení celé plochy dojde zpravidla za jeden zdvih nebo pootočení nástroje. Takto vzniklá obrobená plocha je tvarově i rozměrově velmi přesná a má kvalitní povrch.

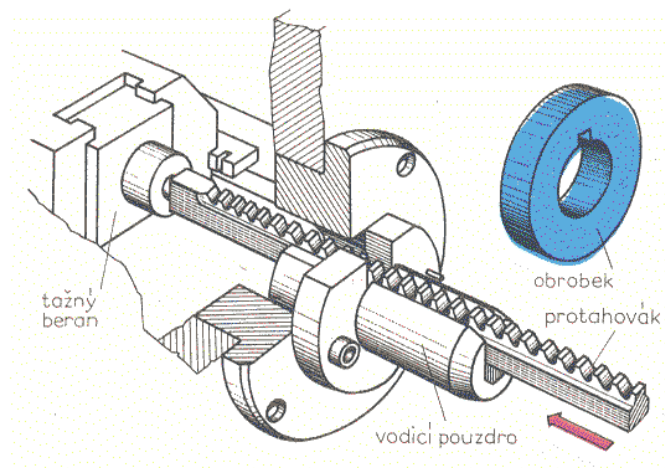
Rozdíl mezi protahováním a protlačováním spočívá ve způsobu přenosu síly ze stroje na nástroj. U protahování je nástroj tažen za jeho přední část (namáhán na tah), naopak u protlačování je nástroj tlačěn do jeho zadní části (namáhán na tlak). Vlastní princip práce je jinak v obou případech totožný.

Obrobek je pevně upnut na stole obráběcího stroje a hlavní řezný pohyb koná nástroj, který je buď přímočarý, nebo otáčivý. Během samotné operace obrábění dochází postupně k záběru více zubů najednou, což šetří čas a zvyšuje produktivitu práce.



Obr. 19 Způsob záběru zubů [13]

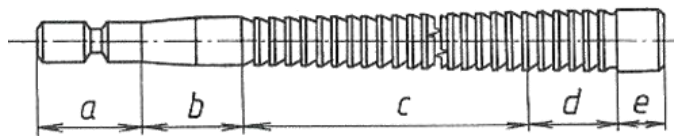
Nástroje určené k protahování jsou tyče kruhového, obdélníkového či jiného průřezu, které se postupně rozšiřují. Každý následující zub je o malou hodnotu vyšší, než zub předcházející. První zuby v záběru nejdříve obráběnou plochu hrubují, další ji obrábějí na téměř požadovaný rozměr a poslední ji kalibrují, případně vyhlazují. Obdobně tomu je i u nástrojů pro protlačování. Velikost takto odebrané třísky, je tedy určena tvarem zubu.



Obr. 20 Princip protlačování a protahování [14]

Nástroje nebo také protahováky či protlačováky, dělíme na několik základních částí:

- a) **Upínací část** – pouze u protahováků
- b) **Přední vedení**
- c) **Řezná část** – Zuby hrubovací, které přicházejí do kontaktu s obrobkem jako první. Odebíraná tříška je zde největší a pro lepší dělení třísek jsou jednotlivé zuby děleny drážkou.
- d) **Kalibrační část** – Jsou tvarově přesné zuby. Jejichž hlavním úkolem je vyhladit obráběnou plochu.
- e) **Zadní vedení**



Obr. 21 Vnitřní protahovák [14]

Zařízení k obrábění vnějších a vnitřních ploch se rozdělují dle pohybu nástroje na dvě skupiny:

- **Vodorovné** – nástroj se pohybuje v horizontálním směru
- **Svislé** – nástroj se pohybuje ve vertikálním směru

Hlavní nevýhoda tohoto druhu obrábění spočívá ve složité výrobě nástrojů a tím spojené vysoké ceně. Z tohoto důvodu nachází uplatnění především v sériové a hromadné výrobě.

Hoblování, obrážení

Hoblováním se nejčastěji obrábějí velké rovinné plochy nebo drážky různých profilů. V porovnání s frézováním je tato metoda výhodnější při opracování dlouhých a úzkých ploch, kde se dosahuje velmi dobré rovinnosti plochy. Metoda obrážení se využívá pro opracování kratších ploch, a to přibližně do délky 800 mm. Obě zmíněné metody mají společný jeden hlavní rys, a to je přímočarý vratný pohyb. Pohyb do řezu vykonává nástroj nebo obrobek, a to do tloušťky třísky. Vratný pohyb je potom nepracovní, což snižuje produktivitu práce. Z tohoto důvodu je zpětná rychlost 1,5x až 4x větší než rychlost pracovní.

Hlavní rozdíl obou metod spočívá ve zmíněném přímočarém vratném pohybu. U hoblování jej koná sám obrobek, který je pevně upnutý na pohybujícím se stole a nůž stojí.

U obrázení je tomu přesně naopak, což znamená, že obrobek stojí a nůž se pohybuje. Další rozdíl je v druhu obráběných ploch. Hoblování slouží zásadně k obrábění vodorovných ploch, přičemž obrázením lze obrábět jak plochy vodorovné, tak i svislé.

Pro oba způsoby obrábění se jako nástroj používá speciální jednobřítý nůž, který je do jisté míry podobný noži soustružnickému.

- **Hoblovací nože**

Pracovní podmínky hoblovacích nožů jsou obdobné jako u nožů soustružnických. Hoblovací nože jsou však velmi namáhány na ohyb při vřezávání nože do materiálu, což může při odpružení nože vést ke vzniku nežádoucího vybrání v obráběné ploše. Aby ke vzniku tohoto jevu nedocházelo, vyrábějí se tyto nože ohnuté proti směru řezu.



Obr. 22 Hoblovací nůž [15]

- **Obrážecí nože**

U svislého obrázení pracují tyto nože v náročných pracovních podmínkách, neboť není zajištěn optimální odvod třísky a dostatečné chlazení. Při velkém vyložení břitu, dochází k pružení a chvění celého nástroje. Aby k tomuto jevu nedocházelo, zvyšuje se jeho tuhost zesílením tělesa nože.



Obr. 23 Obrážecí nůž [15]

U obou způsobů se volí hloubka řezu a velikost posuvu co největší, a to v závislosti na tuhosti celého systému (obrobek, nůž, stroj) a průtažné síle. Při obrábění na čisto se hloubka předposledního řezu volí v rozmezí od 0,5 mm do 1 mm a poslední řez pro jemné hoblování od 0,1 mm do 0,25 mm.

1.2. Nekonvenční metody obrábění

Nekonvenční metody obrábění využívají na rozdíl od konvenčních metod fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu. Jedná se především o bez silové působení na obráběný materiál, bez vzniku klasický třísek, jako známe z obrábění klasickými reznými nástroji. Podle principu úběru materiálu, dělíme tento druh obrábění do třech hlavních skupin:

- Elektrotepelné procesy obrábění
- Elektrochemické a chemické procesy obrábění
- Mechanické procesy obrábění

Tento druh obrábění nalézá široké uplatnění především u materiálů, které jsou běžnými mechanickými způsoby těžce obrobitelné nebo jsou neobrobitelné. Problém obrobitelnosti těchto materiálů vyplývá v jejich vysoké tvrdosti, křehkosti, nevhodných tepelných vlastností, či chemické reaktivity s rezným nástrojem. Rostoucí podíl těchto materiálů v konstrukci strojů, či zvýšené tvarové nároky na součásti mají za následek, stále se zvyšující podíl těchto metod v běžné strojírenské výrobě. Z tohoto důvodu bude v následující kapitole přiblížen základní princip těch nejběžnějších metod nekonvenčního obrábění.

1.2.1. Elektrotepelné procesy obrábění

U elektrotepelných a tepelných procesů obrábění dochází k úběru materiálu pomocí tepelné energie, kterou poskytují vysokoenergetické paprsky elektronů, fotonů, iontů nebo plazmy.

Mezi nejběžnější zástupce patří:

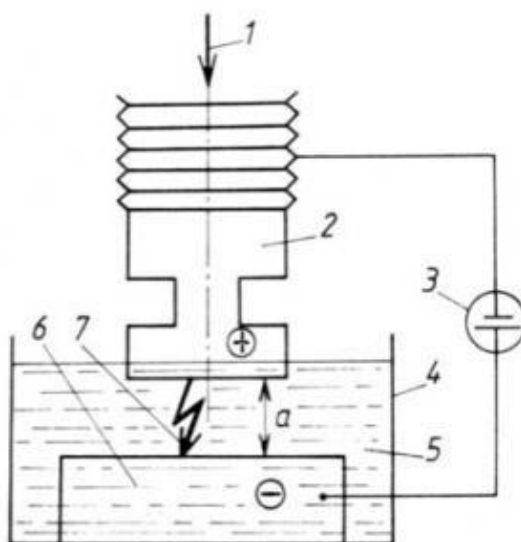
- **Elektroerozivní metoda obrábění**
- **Obrábění plazmou**
- **Obrábění laserem**
- **Obrábění elektronovým paprskem**

Charakteristickým znakem pro tyto procesy je fakt, že k úběru materiálu dochází prostřednictvím zvyšování vnitřní energie atomů v povrchové vrstvě obrobku. Úběr materiálu je tedy výsledek reakce elementární částice energetického paprsku s částicí obráběného materiálu.

Elektroerozivní metoda obrábění

K úběru materiálu dochází pomocí elektrických výbojů mezi dvěma elektrodami, ponořených do kapalného média s vysokým elektrickým odporem – dielektrika (velmi čistá voda, olej nebo petrolej).

Při vzniku magnetického pole mezi elektrodami dochází k pohybu záporných a kladných iontů, které postupně zrychlují a nabývají vysoké rychlosti. Tím dojde k vytvoření ionizovaného kanálu, mezi elektrodami začne protékat elektrický proud a vzniká výboj, který vyvolá řadu srážek jednotlivých částic. Takto vzniklé pásmo o vysoké teplotě ($3000\text{--}12000^{\circ}\text{C}$), způsobí tavení a odpařování materiálu elektrod. Při odpařování dielektrika vznikají plynové bubliny s vysokým tlakem. V okamžiku přerušení elektrického proudu, dojde k poklesu teploty, implozi bubliny a velké dynamické síly vytrhují roztavený materiál z povrchu elektrody. Takto vytržený materiál následně vlivem chladícího účinku dielektrika tuhne a je odváděn pryč z pracovní části ve formě malých částiček. Po takto odebraném materiálu, vznikají na povrchu elektrod malé krátery. Objem odebraného kovu je závislý na časové a energetické charakteristice výboje a na vlastnostech kovu. Výboje vznikají pouze v místech, kde jsou elektrody v průrazné vzdálenosti dielektrika. Část takto vzniklé energie spotřebovává i nástrojová elektroda, což vede k jejímu opotřebení, a proto je potřeba pro zvýšení přesnosti udržovat optimální vzdálenost obou elektrod.



1 – směr posuvu nástrojové elektrody, 2 – nástrojová elektroda, 3 – generátor, 4 – pracovní vana, 5 – tekuté dielektrikum, 6 – obrobek, 7 – elektrický výboj

Obr. 24 Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [16]

Existují i různé modifikace metody elektroerozivního obrábění. Mezi ty nejznámější z nich patří:

- **Elektrojiskrové obrábění**

Princip elektrojiskrového obrábění spočívá v úběru materiálu sérií výbojů, buzených krátkými asymetrickými elektrickými impulsy s velkou amplitudou a délkou 10^{-7} až 10^{-4} s, které vznikají mezi nástrojem a obrobkem v kapalném dielektriku. V důsledku tepelného působení na povrch obrobku, dochází k vymrštění roztaveného materiálu. Stopy po obrábění jsou ve tvaru kráterů, podobně jako tomu je u pískování.

Metoda se běžně používá k hloubení, vrtání, nebo k výrobě tvarových otvorů.

- **Elektroimpulzové obrábění**

Založeno na stejném principu jako elektrojiskrové obrábění. Hlavní rozdíl spočívá v délce elektrického výboje. U elektroimpulzového obrábění trvá výboj 10^{-4} až 10^{-1} s, čímž je zajištěna větší hospodárnost a výkonnost v podobě zvýšeného množství odebraného materiálu, při nižším opotřebením nástroje.

- **Elektrokontaktní obrábění**

K úběru materiálu dochází pomocí přeměny elektrické energie na teplo, které vzniká průchodem elektrického náboje v době kontaktu obou elektrod a taví obráběný materiál. Takto roztavený materiál odvádí otáčející se ocelová nebo litinová nástrojová elektroda ve tvaru kotouče se zářezy (ekvivalence frézy nebo brusného kotouče).

Tento způsob obrábění nahrazuje klasické frézování nebo broušení povrchů. Běžně se proto dá využít k povrchovému čištění odlitků nebo k obrábění kuliček do ložisek.

Obrábění plazmou

Princip obrábění plazmou spočívá v ohřátí nebo tavení materiálu za extrémně vysokých teplot (řádově 5000 až 15000 °C), vznikajících při rozkladu molekul plynu procházejících elektrickým obloukem. Oblouk hoří mezi wolframovou netavící se katodou a anodou, která je buď opracováváný materiál, nebo těleso hořáku.

Každé technologické zařízení na obrábění plazmou se skládá z několika hlavních částí:

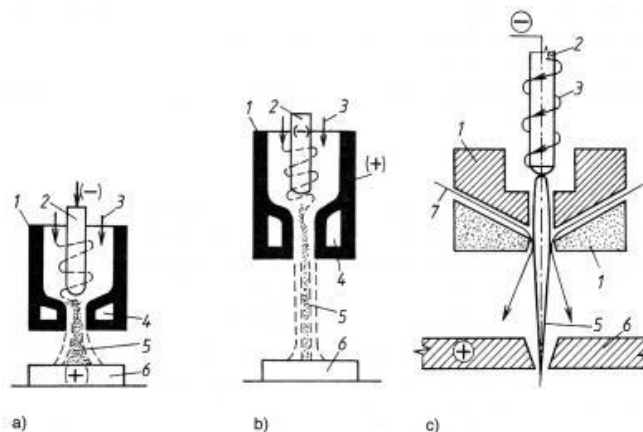
- Plazmový hořák
- Řídicí jednotka
- Manipulační zařízení (manipulátor, robot nebo souřadnicový stůl)
- Zdroj elektrického proudu



Obr. 25 Zařízení pro obrábění plazmovým paprskem [17]

Plazmový hořák je jednou z hlavních částí, díky které dochází k přeměně elektrické energie na energii tepelnou v podobě proudu plazmy. Důležitým parametrem při volbě plazmového hořáku je druh stabilizace elektrického oblouku. Podle druhu použitého stabilizačního media se plazmové hořáky dělí do následujících skupin:

- **Plazmové hořáky s plynovou stabilizací**
- **Plazmové hořáky s kapalnou stabilizací**



Plazmové hořáky s plynovou stabilizací: a) s transferovým obloukem, b) s plynovou stabilizací s netransferovým obloukem, c) s vodní stabilizací (1 – těleso hořáku, 2 – katoda, 3 – přívod plynu (argon), 4 – chlazení hořáku, 5 – paprsek plazmatu, 6 – obrobek, 7 – přívod vody)

Obr. 26 Druhy plazmových hořáků [17]

Metoda plazmového obrábění se běžně využívá k následujícím operacím:

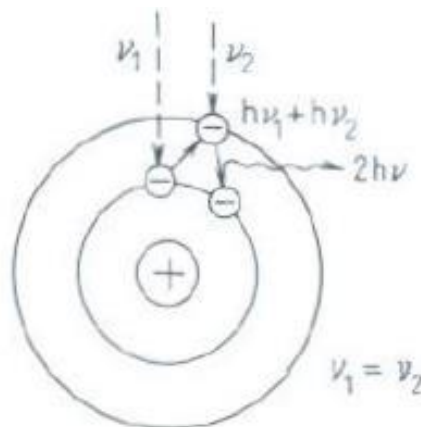
- **Plazmové řezání** – díky vysoké teplotě lze využít k řezání téměř všech kovových materiálů
- **Plazmové svařování** – moderní, vysoce produktivní metoda svařování s ochrannou atmosférou

- **Nanášení povlaků** – umožňuje nanášení železných i neželezných kovů (nanášený materiál je ve formě prášku, který je nataven na povrch součásti)
- **Plazmové obrábění**
 - a) S předehřevem materiálu před břitem řezného nástroje – dochází ke změně mechanických a fyzikálních vlastností materiálu (vyšší životnost břitu)
 - b) Odtavování materiálu z povrchu obrobku – materiál se na obráběném povrchu taví a proudem asistenčního plynu odfukuje (velká drsnost obrobeného povrchu se značným tepelným ovlivněním)

Obrábění laserem

Metoda obrábění laserem je založena na přeměně světelné energie na energii tepelnou. K této změně dochází při styku paprsku laseru s obráběným materiálem, který se v důsledku vzniku vysoké teploty ohřívá, taje a odpařuje se.

Laser pracuje na principu indukované emise, to je vynuceného záření. Jednotlivé částičky světla se mohou vzájemně popohánět a držet spolu krok. Vzniklý paprsek bude koherentní, uspořádaný a bude soustředěn do jednoho směru. [18]



Obr. 27 Princip vzniku indukované emise [18]

Celý princip, lze zjednodušeně vysvětlit na modelu atomu, který navrhl Niels Bohr. Elektrony obíhají kolem jádra atomu po určitých kvantových drahách, každé dráze přísluší určitá energetická úroveň. Dopadá-li na atom záření o kmitočtu ν_1 , přijme nejprve elektron energii $E = h \cdot \nu_1$ a přejde na vyšší kvantovou dráhu (to je dále od jádra, neboť má více energie než přísluší jeho původní kvantové dráze), poté jej následně dopadající záření donutí přijmout další energii a přejít přitom na svoji původní kvantovou dráhu (blíže k jádru atomu) a aby měl elektron energii odpovídající této původní dráze, musí celkovou získanou energii $E = 2h \cdot \nu_1$ vyzářit. Směr šíření a polarizace vzniklé energetické vlny jsou stejné jako u záření, které tento přechod vyvolalo. Zjednodušeně řečeno to vypadá, jako by záření vyslal jeden atom, avšak s energií biliónkrát větší, než může jeden osamocený atom vyslat. [18]

Možností k využití laserové technologie je mnoho a zasahují do mnohých oblastí. Mezi nejběžnější způsoby využití při obrábění patří:

- **Svařování materiálů**

Při tomto druhu svařování se nejčastěji nepoužívá žádný přídavný materiál. Hlavní výhoda tohoto způsobu spočívá v menším ovlivnění okolí svaru.

Metoda je vhodná i pro svařování všech materiálů, které jsou svařitelné klasickými konvenčními metodami, včetně titanu, hliníku a zlata.

- **Vrtání**

Princip vrtání pomocí laseru spočívá v odpařování materiálu, kdy laser vysílá pulzní vlny o vysoké intenzitě záření. Tento způsob lze využít u těžkoobrobitelných kovových i nekovových materiálů.

- **Řezání**

Při řezání je laserový paprsek přiváděn do místa řezu soustavou zrcadel umístěných v pracovní hlavě stroje a zaostřován čočkou.

Podle způsobu odstranění materiálu dělíme řezání do třech skupin:

1. **Sublimační** – k odstranění materiálu dochází především jeho odpařením
2. **Tavné** – materiál je roztaven a následně odfouknut asistenčním plynem
3. **Pálením** – laserový paprsek ohřívá materiál v místě řezu na zápalnou teplotu, kde následně s přiváděným reaktivním plynem (O_2) shoří v exotermické reakci. Zbylá struska je odstraňována asistenčním plynem.

- **Popisování součástí**

Princip značení je založený na místním odpařování materiálu nebo na změně barvy povrchu. Popisovaný povrch může mít různé povrchové vlastnosti (barvu, drsnost, povlak), ale i tvar (rovinné nebo zakřivené plochy).

Běžně se používají dva druhy popisování:

1. **Popis přes masku** – nejjednodušší způsob, kdy místa, která se zakryjí maskou, zůstanou nepopsaná.
2. **Popis vychylováním paprsku laseru** – využívá dvou kolmých zrcadel nebo vláknové optiky

Nově se začal používat i tzv. hloubkový podpis, kde znaky jsou tvořeny jednotlivými body s různou hloubkou. Tento způsob značení se využívá jako ochrana před padělkou, neboť kód (systém rozdělení hloubek jednotlivých bodů) zná pouze výrobce.

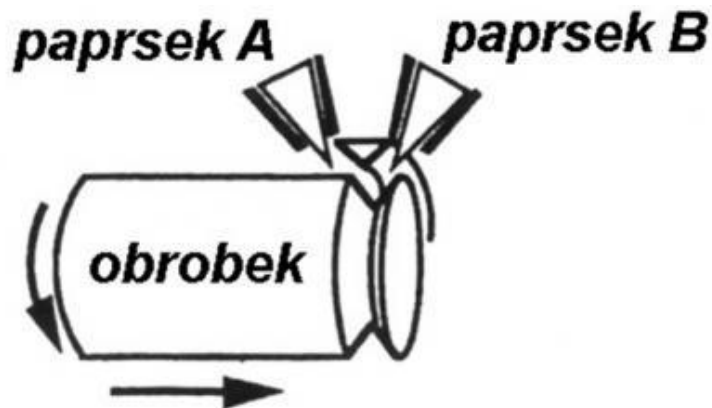
- **Tepelné zpracování**

Charakteristickým znakem pro tepelné zpracování laserem je krátká doba ohřevu a malý objem ohřátého materiálu, přičemž při kalení není potřeba používat chladicí médium. Pracovní podmínky se regulují změnou parametrů laseru a rychlostí pohybu.

- **Soustružení**

Pro soustružení obrobku pomocí laseru se využívá tři způsobů:

1. **Obrábění s předehřevem** – Paprsek laseru je nasměrován na obráběnou plochu těsně před břit rezného nástroje.
2. **Odtavování materiálu z povrchu obrobku** – Při otáčení obrobku vůči laseru dochází k tavení materiálu a jeho následnému odfuku asistenčním plynem z místa obrábění.
3. **Odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky laseru** – Dva paprsky laseru jsou vůči sobě vzájemně skloněny pod určitým úhlem a odřezávají obráběný materiál.



Obr. 28 Princip šroubovitého úběru materiálu [2]

- **Frézování**

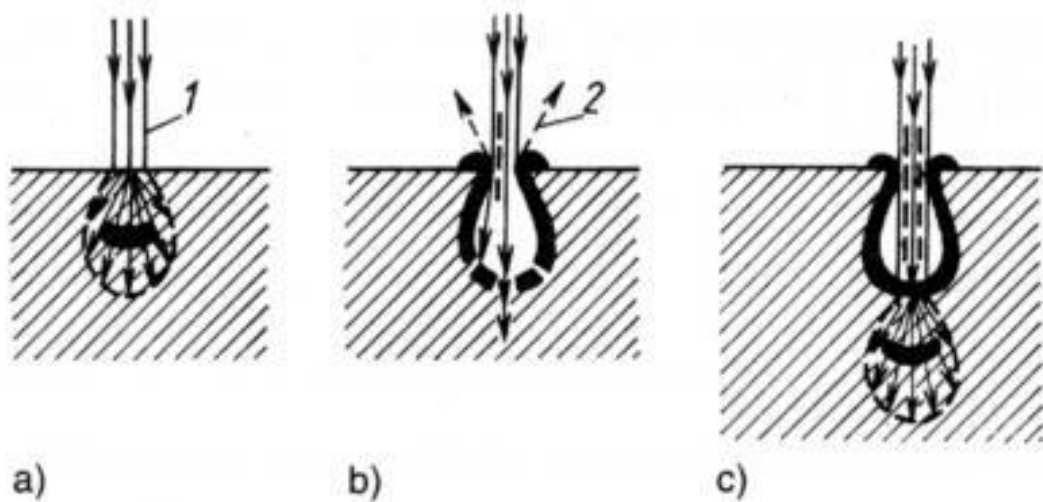
Při frézování laserem se používají dva principy úběru materiálu, které jsou stejné jako u soustružení:

1. **Odtavování materiálu z povrchu obrobku**
2. **Odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky laseru**

Hlavní přednost laserových technologií spočívá v možnosti opracovávání obrobku bez mechanického kontaktu. Nesmíme však opomenout ani možnost technologického opracování těžkoobrobitelných materiálů nebo opracování obrobků na špatně přístupných místech. S tím jsou však spojeny i zvýšené nároky na kvalitní a proškolenou obsluhu.

Obrábění elektronovým paprskem

U obrábění elektronovým paprskem se využívá kinetické energie proudu urychlených elektronů. Při dopadu paprsku elektronů na povrch obrobku se jejich kinetická energie mění v tepelnou, materiál obrobku se taví a následně odpařuje. Tímto způsobem vniká paprsek jen do určité hloubky, kde se pohyb elektronů zastaví. Tepelná energie, která se koncentruje pod povrchem, způsobuje erupční odpařování materiálu. Odpařený materiál se pohybuje vysokou rychlostí ven z otvoru, zároveň takto vzniklé páry ionizují a způsobují nové zaostření paprsku v pracovním místě, čímž dojde dalšímu úběru materiálu.



a) vnik elektronů do materiálu, b) erupční odpařování materiálu, c) opětový vnik elektronů do materiálu

Obr. 29 Princip obrábění elektronovým paprskem [19]

1.2.2. Elektrochemické a chemické procesy obrábění

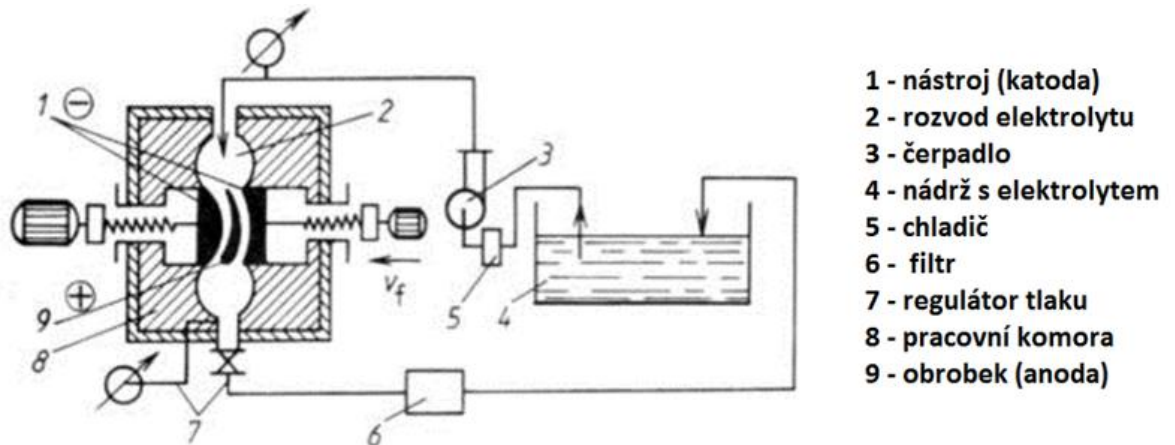
Elektrochemické a chemické procesy obrábění využívají k úběru částic materiálu (atomů nebo molekul) chemické a elektrochemické reakce v kapalném nebo plynném prostředí. I když jsou oba procesy obrábění uváděny společně, tak i přesto mají jiný princip:

- **Elektrochemické procesy obrábění** – k úběru materiálu využito elektrolýzy
- **Chemické procesy obrábění** – úběru dosaženo rozpouštěním obráběného materiálu

Elektrochemické obrábění

Elektrochemické obrábění je způsob řízeného beztržiskového obrábění u elektricky vodivých materiálů.

Podstatou tohoto procesu je elektrolyza. Jedná se tedy o řízený lokální úběr materiálu, prostřednictvím anodického rozpouštění v elektrolytu, který proudí mezerou mezi elektrodami. Anodu zde představuje obrobek a katodu nástroj, který má tvar negativu obrobku.



Obr. 30 Schéma zařízení pro elektrochemické obrábění vnějších ploch [20]

Množství takto odebraného materiálu je závislé na minimální pracovní mezeře mezi elektrodami (od 0,05 mm až do 1 mm), teplotě, rychlosti proudění a složení elektrolytu.

Pro dosažení přesně obrobenej plochy, je třeba provést určitou korekci nástroje, popřípadě nanést na boky nástroje izolační vrstvu, která zabrání úběru materiálu v nežádoucím místě.

Tento způsob obrábění se nejčastěji používá u tvarově náročných součástí, nebo u těžko obrobitelných materiálů, jako jsou šedá litina, duraly obsahující křemík nebo slitiny s velkým obsahem uhlíku.

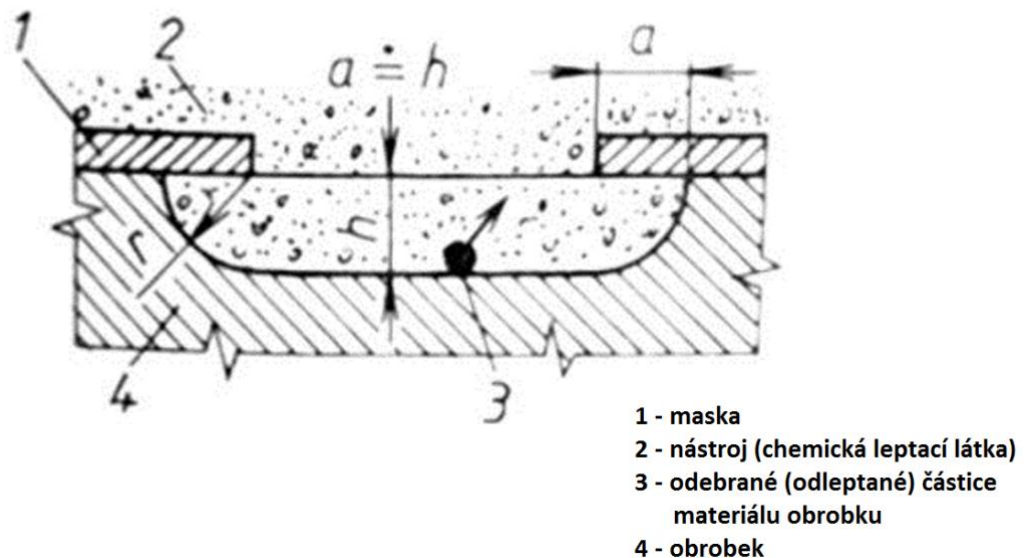
Chemické obrábění

Tyto procesy obrábění využívají chemické reakce mezi obrobkem a leptající látkou pro úběr tenkých vrstev materiálu.

Základem chemického obrábění je řízené odleptávání povrchu obrobku, přičemž tloušťka odebrané vrstvy se pohybuje od několika setin milimetru až do několika milimetrů. Odleptávání je vlastně výsledek chemické reakce mezi materiálem obrobku a reaktivním prostředím, které

je tvořeno kyselinami nebo zásadami. Neleptané plochy je třeba chránit tzv. maskami, což jsou speciální povlaky, které jsou odolné proti působícím chemikáliím reaktivního prostředí.

Typický jev, který u tohoto způsobu obrábění nastává je tzv. podřezávání. Při podřezávání dochází k odleptání materiálu, který se nachází již pod maskou. Množství takto odebraného materiálu se přibližně rovná tloušťce odleptané vrstvy.



Obr. 31 Princip chemického obrábění [21]

Proces chemického obrábění je velmi pomalý děj. Využívá se především na kovové materiály jako je hliník, měď, zinek a další. Typickým příkladem může být výroba tištěných spojů.

1.2.3. Mechanické procesy obrábění

U mechanických procesů obrábění dochází k úběru materiálu přímým mechanickým účinkem brusných částí, které dopadají na povrch obrobku s určitou kinetickou energií. Mezi nejběžnější metody charakterizující tuto skupinu obrábění patří:

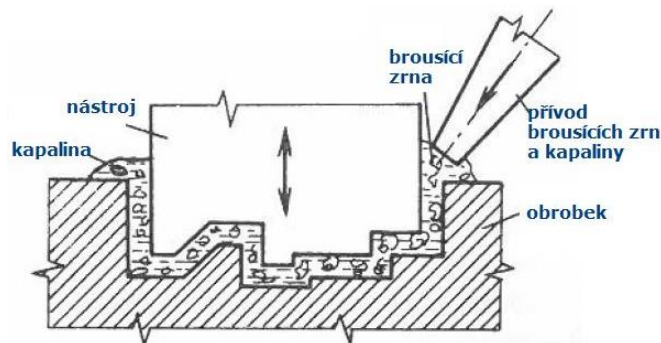
- **Ultrazvukové obrábění**
- **Obrábění vodním paprskem**

Obrábění ultrazvukem se do této kategorie řadí právě proto, že úběr materiálu je způsoben erozí materiálu, k čemuž je potřeba hydromechanická energie.

Ultrazvukové obrábění

Ultrazvukové obrábění je řízené rozrušování povrchu obrobku, způsobené pohybem abrazivních zrn a působením kavitace eroze. Princip je tedy založen na mechanickém úběru materiálu.

Abrazivní zrna jsou přiváděna mezi obráběnou plochu a nástroj, který vykonává kmitavý pohyb kolmo k obráběné ploše o frekvenci 18 až 25 kHz a amplitudě 10 až 100 μm . Nástroj může vykonávat také přímočarý posuvný pohyb nebo kombinaci obou pohybů zároveň. Abrazivní zrna jsou přitlačována na obráběnou plochu řízenou stálou silou, čímž dochází ke kopírování tvaru činné části nástroje, která má tvar negativu obráběné plochy.



Obr. 32 Princip obrábění ultrazvukem [22]

Zařízení pro ultrazvukové obrábění se skládá z několika dílčích částí:

- **Generátor ultrazvukových kmitů** – Systém pro vytvoření mechanických kmitů
- **CNC řídicí systém.**
- **Systém pro přívod a odvod abrazivních zrn**

Rozhodující vliv na drsnost, kvalitu a množství odebraného materiálu má velikost a tvrdost abrazivních zrn, která jsou obsažena v kapalině. Tato kapalina je nejčastěji voda, lín, petrolej nebo strojní olej. Svým kavitacním účinkem přispívá k úběru materiálu a podle své viskozity tlumí pohyb abrazivních zrn.

U tohoto způsobu obrábění je potřeba zajistit vhodný přívod nových zrn a odvod opotřebovaných zrn z pracovního prostoru. Důležitou roli zde hraje také koncentrace zrn v kapalině, která by měla být od 30 až do 40 %.

Hlavní nevýhoda tohoto způsobu obrábění spočívá v abrazivním účinku zrn nejen na obráběnou součást, ale i na nástroj samotný.

Tato metoda se běžně používá k opracování velmi tvrdých a křehkých materiálů s tvrdostí nad 40 HRC, což je nejčastěji sklo, křemen, diamant, karbidy a další. Existují však i jiné varianty pro využití této metody, a to například čištění povrchů, sváření, nebo dělení materiálu.

Obrábění vodním paprskem

Technologie obrábění vodním paprskem využívá kinetické energie vysokotlakého a vysokorychlostního proudu vody, který nahrazuje řezný nástroj. Pro zvýšení řezného výkonu se přidává jemné brusivo, čímž se rozšiřují možnosti využití.

Obrábění vodním paprskem se tedy dělí na dva základní druhy:

- **Čistý vodní paprsek** – pro obrábění nekovových materiálů
- **Vodní paprsek s abrazivní příměsí** – pro obrábění tvrdých materiálů (titan, sklo)

Princip řezání vodním paprskem spočívá v odebrání materiálu pomocí erozivního účinku proudu vody o vysoké rychlosti a kinetické energii, který vniká do obráběného materiálu. Po vstupu proudu vody do materiálu, dochází k postupnému poklesu kinetické energie a řezné schopnosti. Na kvalitu obrobeneho povrchu má zásadní vliv tlak proudu vody (300 až 400 MPa), průměr trysky, počet a typ laminátových vrstev (popřípadě i směr).

Výhody:

- Minimální tepelné ovlivnění povrchu
- Vysoká rychlost řezu
- Možnost řezat tvarově složité plochy v úzkých tolerancích
- Možnost řízení dráhy proudu vody počítačem

Nevýhody:

- Omezená stabilita proudu vody v kolmém směru (dochází k vychylování)
- Pokles řezné schopnosti se zvyšující se hloubkou řezu
- Vylamování a praskání obráběného materiálu v místě výstupu vody
- Opatření trysky při využití abrazivních částic



Obr. 33 Zařízení pro obrábění vodním paprskem [23]

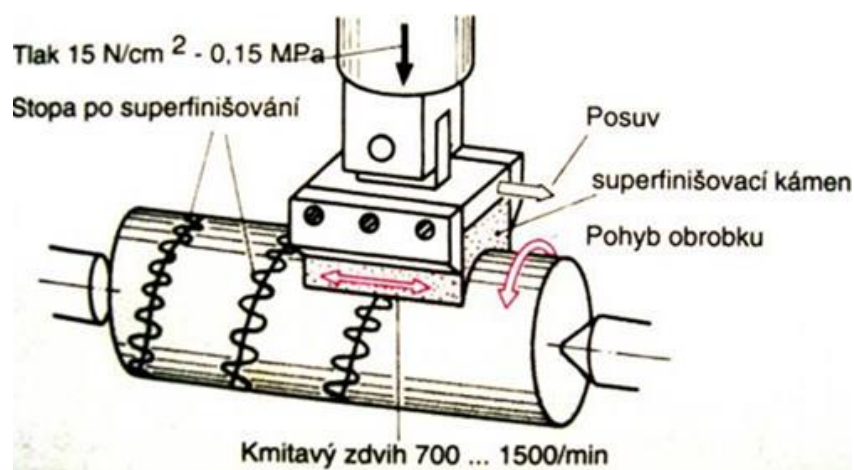
1.3. Přesné a dokončovací metody obrábění

Pod pojmem přesné a dokončovací metody obrábění se skrývá technologický proces, který bývá nejčastěji poslední výrobní operací po předešlém opracování. Těmito metodami obrábění je dosahováno finálních parametrů povrchu obrobku. Jedná se především o přesnost rozměrů, tvarů, vlastností povrchové vrstvy (mechanických i fyzikálních), nebo i vzhledu. Tyto zmíněné parametry jsou důležitou složkou každé součásti, ať už z hlediska vzhledu, funkčnosti, nebo životnosti. Jednotlivé dokončovací metody však často splňují jen část ze zmíněných požadavků, proto je nutné zvolit takovou metodu (nebo jejich kombinaci), která zajistí určitý kompromis mezi jednotlivými parametry.

1.3.1. Superfiniš

Je dokončovací operace vnějších a vnitřních rotačních ploch, na nichž je dosahováno vysoké přesnosti při nízké drsnosti. Hlavní částí je 1 až 2 superfinišovací kameny, vykonávající rychlý kmitavý a rotační pohyb (v některých případech může rotační pohyb vykonávat sám obrodek).

Při pohybu superfinišovacích kamenů po ploše obroku dochází k postupnému odřezávání nerovností jemnými zrny kamenů, až do chvíle snížení přitlačné síly a tím spojeným zastavením řezného procesu (kameny začnou po povrchu „plavat“).

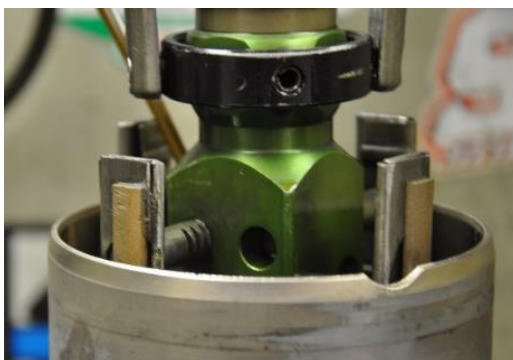


Obr. 34 Superfiniš [24]

1.3.2. Honování

Je jemné, třískové obrábění otvorů pomocí několika honovacích kamenů, které jsou upnuty na tzv. honovací hlavici. Tyto kameny jsou radiálně přitlačovány k opracovávané ploše a vykonávají přímočaře vratný a rotační pohyb. Použitím dostatečně velkého množství přiváděné řezné kapaliny, dosahujeme chlazení, vyplavování třísek obráběného materiálu a otěru kamenů.

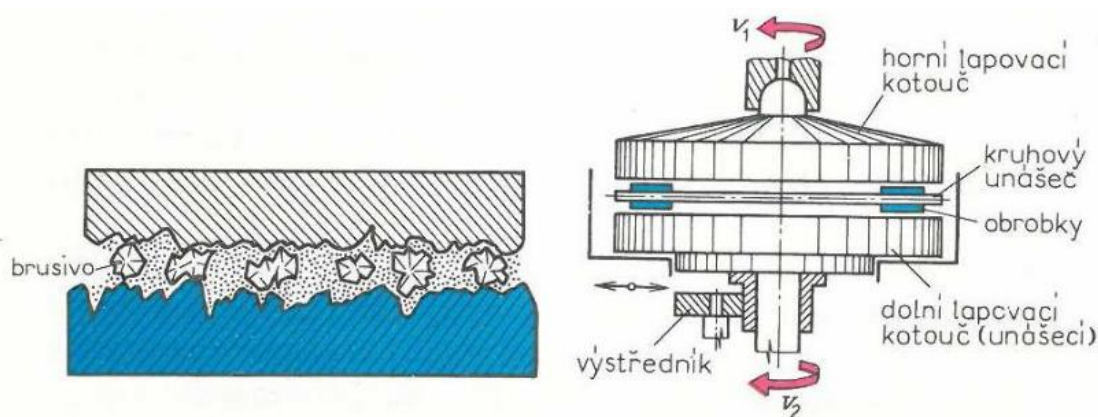
Honovací kameny při svém pohybu vytvářejí na válcovém povrchu křížové drážky, kterých se běžně využívá pro zlepšení přilnavosti oleje u válců spalovacích motorů.



Obr. 35 Honování stěn válce [25]

1.3.3. Lapování

Lapování je proces obrušování povrchu obrobku jemnými brusnými zrnky, jež jsou volně nesený v lapovací kapalině (olej, petrolej), popřípadě v pastě (např. parafin). Tato směs je přitlačována na opracovávanou plochu pomocí lapovacího nástroje, který má tvar negativu lapované plochy. Nástroj i obrobek se vůči sobě relativně pohybují v proměnlivých drahách a při velmi malých rychlostech.

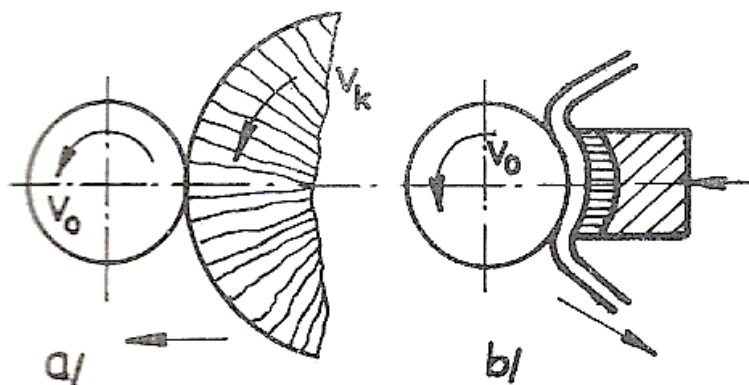


Obr. 36 Lapování rovinných obrobků [26]

1.3.4. Leštění

Je jemné ruční, popřípadě strojní obrábění, jehož cílem je zlepšit vzhled povrchu obrobku. Leštění je realizováno pomocí plstěných nebo lamelových kotoučů, konajících hlavní rotační pohyb, na jejichž povrch je nanášeno velmi jemné brusivo ve formě pasty nebo emulze.

Leštěním dochází k odstraňování povrchových nečistot a ke zvýšení jakosti povrchu, avšak rozměrové a tvarové přesnosti se téměř nemění.



Obr. 37 Leštění [2]

1.3.5. Omílání

Omílání je dokončovací proces drobných obrobků ve vhodně zvoleném pracovním médiu. Toto médium se skládá z kapaliny, brusiva a balastu. Brusivo neboli omílací tělíska jsou uměle vytvořené brusné segmenty různých tvarů, velikostí a drsností. Celý proces probíhá za předpokladu uvedení obrobků a pracovního média do míšivého pohybu otáčením, popřípadě vibrací bubnu. Výsledkem procesu je odstranění drobných nerovností a koroze.



Obr. 38 Proces omílání v bubnové omílačce [27]

1.3.6. Tryskání

Metoda tryskání je jednou z dalších variant dokončovacích metod, která je založena na abrazivním opotřebení. K úběru materiálu dochází pomocí volných abrazivních částic, které dopadají vysokou rychlostí na opracovávanou plochu. Jako nosné médium se nejčastěji využívá stlačený vzduch, popřípadě kapalina.

Celý proces probíhá bez tepelného ovlivnění materiálu a dochází při něm i k částečnému zpevnění povrchové vrstvy.

Hlavní nevýhoda této metody spočívá v nutnosti občasné výměny abrazivních částic, neboť dochází k absorpci vzdušné vlhkosti, různých nečistot a jejich postupnému opotřebení (zakulacení).



Obr. 39 Tryskací kabina [28]

2. Tlakové lití

Technologie tlakového lití umožňuje výrobu tenkostěnných, ale i konstrukčně složitých odlitků. Hlavním charakteristickým znakem odlitků z vysokotlakého lití je hladký a čistý povrch, což eliminuje nutnost další povrchové úpravy či dodatečného obrábění. Technologii tlakového lití rozdělujeme na dva základní typy. První je tlakové lití “s teplou komorou“ a druhý je tlakové lití “se studenou komorou“. U prvního zmíněného typu, je komora přímo ponořena v tavenině. Tento postup lze však použít pouze u materiálů, které ve formě taveniny neovlivňují části licí komory, a proto se nejčastěji využívá pro výrobu odlitků z hořčíku nebo zinku (tedy kovy s nízkou teplotou tání). U výroby odlitků z materiálů jako jsou slitiny hliníku nebo mědi, používáme metodu lití se studenou komorou, kde se lisovací komora nachází mimo zásobní nádobu s roztaveným kovem.

Jelikož cílem této práce je optimalizace procesu obrábění u odlitků z hliníkových slitin používaných v automobilovém průmyslu, bude se další část této kapitoly zabírat pouze tlakovým litím se studenou komorou.

2.1. Proces tlakového lití

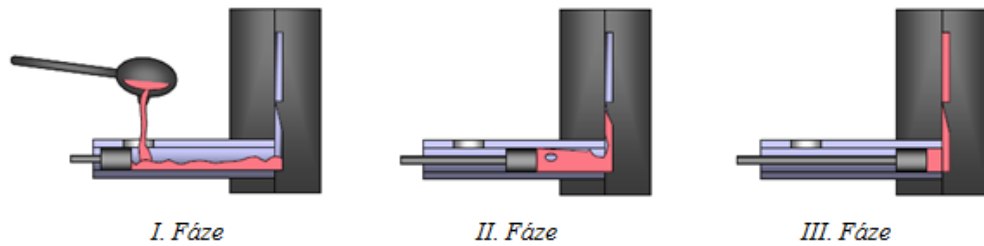
Proces tlakového lití spočívá v tom, že je roztavený kov pístem vtlačován do dutiny tlakové formy, velkou rychlostí a pod vysokým tlakem (2 až 500 MPa). Samotný proces tlakového lití se potom skládá z několika dílčích kroků:

- 1) Ošetření vnitřní dutiny licí formy separační látkou a její následné vysušení stlačeným vzduchem z důvodu eliminace nalepování roztaveného materiálu na části formy.
- 2) Uzavření licí formy včetně případného zasunutí pohyblivých jader a namazání lisovacího pístu.
- 3) Nadávkování potřebného množství roztaveného materiálu a jeho zalisování, které probíhá ve 3 fázích (viz. Obr. 40):

I. Fáze – plnění licí komory roztaveným materiálem

II. Fáze – zalisování roztaveného materiálu do dutiny formy

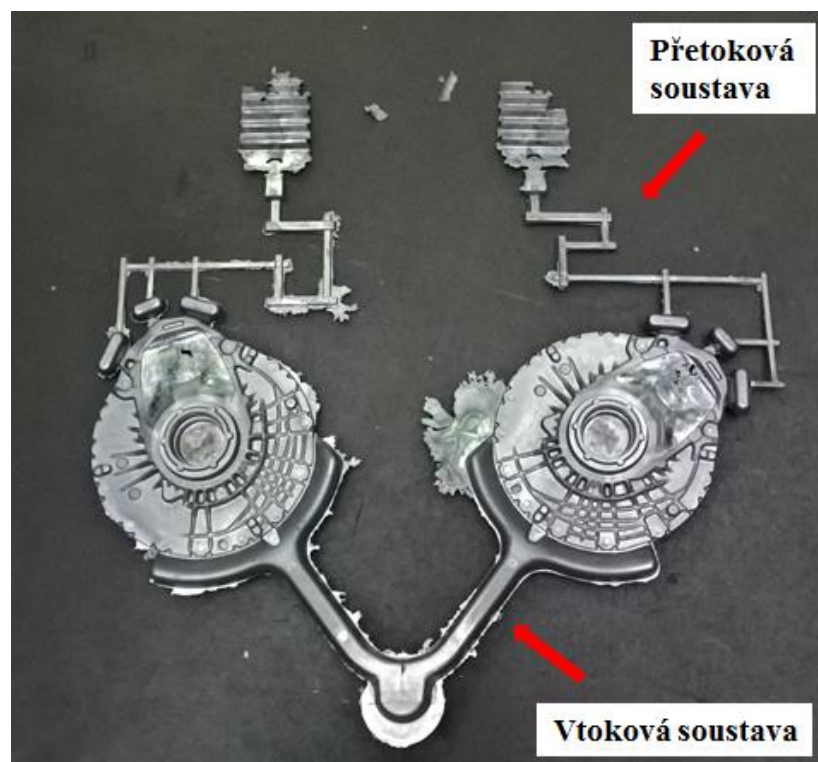
III. Fáze – dodatečný dotlak (zvýšení tlaku lisovacího pístu) pro zhutnění materiálů



Obr. 40 Zalisování roztaveného kovu do dutiny formy [29]

- 4) Tuhnutí taveniny uvnitř licí formy.
- 5) Otevření tlakové licí formy včetně vyjetí pohyblivých jader s případným odstrižením vtokové tablety.
- 6) Vytlačení odlitku vyhazovacími tyčemi, jeho vyjmutí z formy a zchlazení v chladicí lázni

Zachlazený odlitek je následně na matrici ostříhovacího lisu zbaven vtokové, přetokové soustavy a nálitků, které se ve formě vratného materiálu vrací zpět k dalšímu přetavení. Takto vyrobené odlitky jsou ve většině případů dle specifických požadavků zákazníka ještě dále obráběny, a to z důvodu získání požadovaných rozměrových vlastností.



Obr. 41 Výpadek z formy odlitků 1733-00

2.2. Slitiny hliníku

Slitiny hliníku, které se běžně používají při tlakovém lití, musí být dobře slévateľné, ale zároveň musí vykazovat i vhodné mechanické vlastnosti a dostatečnou pevnost při vyšších teplotách. Díky těmto vlastnostem, nedochází u tlakově litých odlitků při rychlém a bržděném smršťování k jejich praskání. Mezi nejběžnější druhy slitin, které se v praxi pro tlakové lití nejčastěji používají, patří slitiny hliníku s křemíkem – tzv. siluminy. Jedná se o slitiny v okolí eutektického bodu s výhodnými slévářenskými vlastnostmi. Typickými představiteli této skupiny materiálů jsou (číslo za prvkem je množství v hm. % ve slitině): AlSi12, AlSi5Cu2, AlSi10MnMg a AlSi5Cu2. V současné době nachází velké uplatnění i slitina AlSi9Cu3 ze které jsou vyrobeny odlitky, které používáme pro optimalizaci procesu obrábění (v kapitole 3. bude podrobněji vysvětleno). Odlitky z této slitiny se po vyjmutí z formy zchlazují v chladicí lázni, což přispívá nejen ke stabilitě rozměrů pro následnou operaci ostříhu, ale i k tepelnému zpracování (vytvrzení).

2.3. Formy pro tlakové lití

Pro technologii tlakového lití se používají trvalé kovové formy, jejichž tvar vnitřní dutiny odpovídá negativu tvaru odlitku. Tyto formy se skládají ze dvou a více částí, součástí jsou pak i jádra a vyhazovací tyče. Počet jednotlivých částí je přímo závislý na složitosti odlitku. Součástí každé formy je chladicí a temperační okruh, který zajišťuje vhodné rozložení teploty tak, aby nedocházelo k nadměrnému tepelnému zatěžování jednotlivých částí formy a zároveň nedocházelo k tuhnutí taveniny dřív, než dojde k vyplnění celé dutiny.

Jelikož se dutina formy plní při vysoké rychlosti a pod vysokým tlakem taveniny, jsou zde kladeny velké požadavky na vlastnosti materiálu formy. Jednotlivé části formy musí odolávat fyzikálním, mechanickým i chemickým vlivům taveniny. Abychom zajistili dostatečně dlouhou životnost formy, je třeba volit vhodný materiál, popřípadě povrchovou úpravu nejvíce namáhaných částí (nedostatečně chlazených).

Velký důraz je také kladen na velikost přitlačné síly, která k sobě přitlačuje jednotlivé části formy. Její velikost je přímo závislá na ploše odlévaného dílu a na lisovacím tlaku pístu. V případě malé přitlačné síly, by docházelo k prostříku taveniny v dělicí rovině formy a nedostatečnému vyplnění vnitřní dutiny.

Tavenina je do dutiny formy vtlačována vtokovou soustavou přes vhodně zvolené naříznutí formy (otvor vstupující do dutiny formy). Ve formě se tavenina postupně rozprostírá a po celkovém naplnění je část taveniny vytlačována do přetokové soustavy. Hlavním účelem přetokové soustavy je zajistit odplynění vnitřní dutiny a tím zamezit vzniku nadměrné porezity uvnitř odlitku (vzduchových bublin). Velikost vzniklé porezity ovlivňuje hned několik faktorů. Mezi ty základní patří průběh cyklu zalisování, vnitřní tvar dutiny, ale i úhel naříznutí.

U symetrických odlitků, lze formy pro tlakové lití konstruovat buď jako jedno fazónové (jedno dutinové), nebo jako více fazónové (více dutinové), jako tomu je v našem případě na Obr. 42. Počet jednotlivých fazón se odvíjí od velikosti odlévaného dílu a od velikosti přítlačné síly obou částí formy. Hlavní výhoda více fazónových forem spočívá v rychlosti a ekonomičnosti výroby jednotlivých odlitků.



Obr. 42 Tlaková licí forma odlitku 1733-00

2.4. Vady odlitků

Vady odlitků jsou stejně tak jako u každého jiného výrobku, nežádoucím a značně nepříjemným problémem, který značně ovlivňuje plynulý chod výroby. Jednotlivé vady pak mohou způsobit značné ekonomické ztráty. Hlavní snahou je proto tyto vady identifikovat, pokud možno v prvotní fázi výrobního procesu a odstranit jejich příčiny vzniku tak, abychom dosáhli stabilního procesu s minimální zmetkovitostí.

Abychom byli schopni určit jednoznačně příčiny vady, je potřeba si jednotlivé vady přesně identifikovat. Jako pomůcka k tomu slouží různé katalogy vad, popřípadě lze využít i norem, které se danou problematikou zabývají. Jako příklad můžeme uvést normu ČSN EN ISO 8785 [30], která obsahuje všechny typy vad, týkající se slévárenství. V následující části jsou uvedeny ty nejběžnější vady, které se přímo týkají vysokotlakého lití hliníku.

- **Vnější vady**

Jsou vady týkající se tvaru, popřípadě povrchu odlitku a jsou poměrně snadno odhalitelné.

- **Puchýře**

Tato vada se vyznačuje zvětšením (vydutím) tvaru nad povrch odlitku. Příčina jejího vzniku je v přítomnosti vzduchové bubliny, která je těsně pod povrchem a po vyjmutí teplého odlitku z formy se rozpíná ve směru nejmenšího odporu.



Obr. 43 Puchýře

- **Studené spoje**

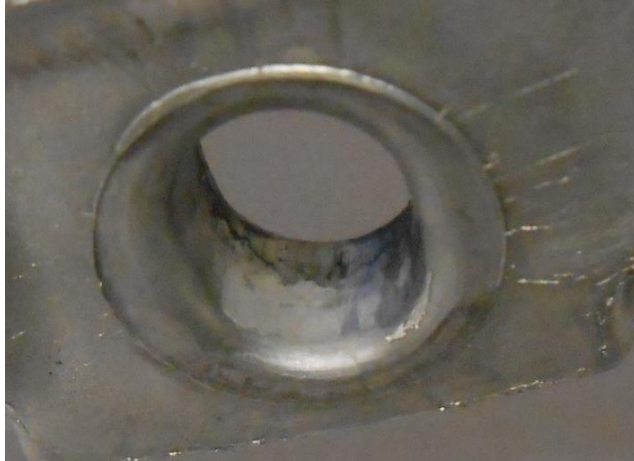
Jsou tenké linky nebo vzory, které představují hranice jednotlivých proudů při plnění formy taveninou. K jejich vzniku dochází v důsledku nerovnoměrného tuhnutí taveniny na vnitřních stěnách dutiny formy.



Obr. 44 Studené spoje

- **Zadřeniny**

Jsou lesklé škrábance na povrchu odlitku, jejichž směr je paralelní se směrem otevírání formy, vytahování odlitku z formy nebo ve směru pohybu jader.



Obr. 45 Zadřeniny

- **Vytržený materiál (nalepená forma)**

Je zahloubení na povrchu odlitku, ke kterému došlo v důsledku vytržení vrstvy materiálu, která se „nalepila“ na povrch formy.



Obr. 46 Vytržený materiál

- **Trhliny**

Je vystouplá pavučinová struktura, způsobená smršťovacím napětím v důsledku bržděného smrštění odlitku. Bržděného smrštění odlitku dosahujeme pomocí temperačního okruhu, který zajišťuje rovnoměrné tuhnutí roztaveného

materiálu. V případě neřízeného smrštění by roztavený materiál v různých částech formy (v závislosti na tvaru a tloušťce odlitku) tuhnul různou rychlostí, což by zapříčinilo vznik povrchového i vnitřního napětí, které může způsobit porušení krystalické mřížky (celistvosti materiálu).



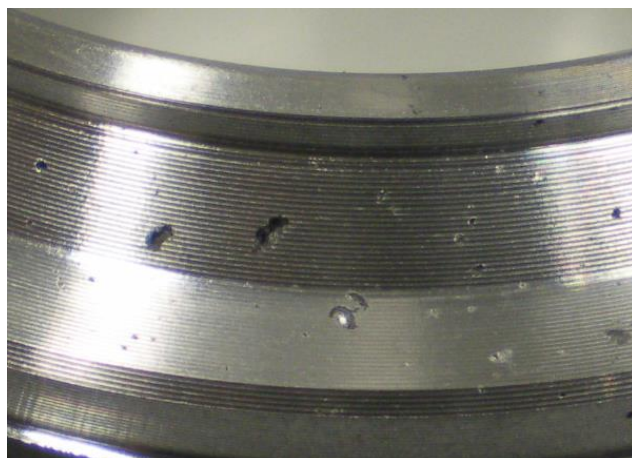
Obr. 47 Trhliny

- **Vnitřní vady**

Jsou podpovrchové vady, které se bez použití speciálních prostředků běžně neodhalí.

- **Porezita**

Jsou kulaté prázdné dutiny s hladkým a zářivým povrchem. Tyto dutiny vznikají v důsledku nedostatečného odplynění roztaveného materiálu, nebo při špatném průběhu plnění formy.



Obr. 48 Porezita na obrobene ploše

- **Vměstky**

Jsou nekovové příměsi, mezi které řadíme různé oxidy, intermetalické fáze nebo nekovové prvky, které vnikají do taveniny při jejím tavení.



Obr. 49 Vměstky na obrobené ploše

- **Lunkry**

Jsou prázdné dutiny, vznikající v důsledku smrštění materiálu při jeho nerovnoměrném tuhnutí. Povrch těchto dutin má na rozdíl od porezity ostré rohy a hrany.

Metody pro zjišťování jednotlivých vad jsou různé, neboť záleží na jejich umístění. U vnějších vad se nejčastěji využívá klasické vizuální kontroly nebo kapilární zkoušky. V případě vnitřních vad je situace o něco složitější. Proto se u odlitků provádí v pevně stanovených časových intervalech rentgenové nebo destrukční zkoušky, které umožňují tyto vady odhalit.

V současné době se v automobilovém průmyslu, stále více a více objevují díly ze slitin hliníku, vyrobené právě technologií tlakového lití. Hlavní výhodou této technologie je již zmíněná schopnost výroby tvarově členitých, ale i tenkostěnných odlitků (cca od 1-2 mm) s vysokou rozměrovou přesností a dobrými mechanickými vlastnostmi. Její nevýhoda spočívá především ve vysokých vstupních nákladech, neboť pořizovací cena licích zařízení a výroba forem je poměrně vysoká.

3. DOE – Taguchicho přístup

Taguchicho statistické metody, nebo jinak nazývané robustní návrhové metody, byly vyvinuté D. R. Taguchim za účelem zlepšení kvality vyráběného zboží s možností uplatnění ve strojírenství, biotechnologii, marketingu nebo reklamě. Profesionální statistici uvítali tyto vylepšení a nové cíle, které Taguchicho metoda přinesla, především se pak jedná o vývoj vzorců pro studium variací. Naopak, ale kritizovali neúčinnost některých jeho návrhů.

Kapitola zabývající se vysvětlením principu a postupu metody DOE využívající Taguchicho přístup, byla zpracována na základě diplomové práce pana Konečného [36], který se touto problematikou již zabíral při optimalizaci parametrů svařování u vysokopevnostních materiálů. Princip jednotlivých kroků zůstává téměř stejný, a proto ho lze aplikovat i na problematiku týkající se obrábění.

Pod pojmem experimentování se skrývá testování kombinací různých hodnot (úrovní) faktorů, o kterých si myslíme, že mají určitý vliv na charakteristiku jakosti sledovaného objektu. Jelikož testování všech možných variant představuje neúměrně velký počet zkoušek, které jsou z časového, a hlavně ekonomického hlediska dost náročné, používají se tzv. zkrácené zkoušky. Těmito zkouškami se provádí nejmenší nutný počet experimentů s maximálním množstvím získaných informací.

Mezi nejpoužívanější metodu zkrácených zkoušek patří již zmíněná metoda DOE (Design of Experiments), která představuje standardizovanou formu postupu plánování experimentů, kterou na začátku 20. let minulého století vymyslel Angličan R. A. Fisher. Na konci 40. let minulého století začal D. R. Taguchi usilovat o zjednodušení a standardizaci této metody. Výsledkem jeho práce byla metoda, která je úspěšně uplatňována v mnoha organizacích.

Taguchicho přístupem je jakost definována jako množství ztrát, které objekt způsobí poté, co byl dán do užívání. Tímto přístupem lze stanovit velikost nákladů způsobených špatnou kvalitou objektu. Dle Taguchicho filozofie je třeba jakost procesu nebo výrobku navrhovat a nejen kontrolovat. Samotná aplikace metody DOE je sice ve fázi návrhu značně časově náročná, ale o to větší zisk přináší. Obecně se jedná o:

- Zlepšování jakosti
- Snižování nákladů
- Redukci množství neshodných výrobků
- Vyšší spokojenost zákazníka

Pro lepší pochopení celé metody je třeba vysvětlit několik základních pojmů:

- **Charakteristika jakosti**

Je veličina, pomocí které vyjadřujeme určité vlastnosti výrobku nebo procesu. V experimentální terminologii je charakteristika jakosti závislou proměnnou, pomocí které jsou kvantifikovány výsledky experimentů.

- **Faktor**

Faktor je chápán jako nezávislá navrhovaná proměnná, která přímo ovlivňuje výslednou charakteristiku jakosti. Symbolicky se značí velkými tiskacími písmeny například A, B, C atd. Jejich úrovně pro experiment jsou označeny jako A1 (první úroveň faktoru A), A2 (druhá úroveň faktoru A) apod.

Tyto faktory se dělí do dvou skupin:

- a) Spojité – v určité úrovni lze nastavit jejich libovolnou hodnotu (ve vymezeném rozsahu), např. teplota a tlak
- b) Diskrétní – v určité úrovni lze nastavit pouze konkrétní hodnotu nebo status, např. druh materiálu

Faktory se rozdělují i dle způsobu zacházení:

- a) Regulovaný faktor – Je námi navrhovaná proměnná, o které si myslíme, že ovlivňuje charakteristiku jakosti a je součástí experimentu. Tuto proměnnou můžeme a zároveň chceme nastavit a udržovat na požadované hodnotě.
- b) Šumový faktor – Je nežádoucím faktorem, který negativně ovlivňuje výslednou charakteristiku jakosti a tím narušuje funkci produktu. Tento druh faktoru nemůžeme anebo ani nechceme při vlastní aplikaci nastavit a udržovat na požadované hodnotě.

- **Interakce**

Vyjadřují vliv nastavení jednoho faktoru na faktoru druhém a symbolicky se značí jako AxB. Pokud označíme celkový počet faktorů N, lze počet interakcí mezi nimi určit vztahem $[N*(N-1)]/2$. Z toho vyplývá, že jich může existovat velké množství, avšak z důvodu efektivního a správného návrhu experimentu, musíme vytvořit rozumný poměr mezi nimi a zkoumanými faktory. Taguchicho DOE se proto zabývá, pouze interakcemi prvního řádu a interakce vyšších řádů zanedbává.

- **Ortogonalní soustavy**

Ortogonalní soustavy jsou Taguchim sestavené speciální tabulky, pomocí kterých lze definovat pouze malou část z velkého počtu experimentů s maximálním množstvím získaných informací. V praxi se jedná o to, že budeme-li například chtít zjistit vliv 6 faktorů o 2 úrovních, bude třeba provést 2^6 pokusů (tj. 64 pokusů). Z uvedeného je zřejmé, že provedení všech pokusů, by bylo časově i finančně dosti náročné. Pomocí ortogonalní soustavy L-8, lze tento počet zredukovat na 8 pokusů.

Tab. 1 Ortogonalní soustava L-8

<i>Sloupec</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
<i>Číslo experimentu</i>							
<i>1</i>	1	1	1	1	1	1	1
<i>2</i>	1	1	1	2	2	2	2
<i>3</i>	1	2	2	1	1	2	2
<i>4</i>	1	2	2	2	2	1	1
<i>5</i>	2	1	2	1	2	1	2
<i>6</i>	2	1	2	2	1	2	1
<i>7</i>	2	2	1	1	2	2	1
<i>8</i>	2	2	1	2	1	1	2

V uvedené ortogonalní soustavě si lze všimnout 8 řádků a 7 sloupců. Řádky reprezentují číslo pokusu s danou úrovní faktorů, které jsou označeny číslicemi 1 nebo 2. Sloupce poté indikují možnosti přiřazení úrovně daného faktoru.

U dvouúrovňových faktorů se v praxi při navrhování nejčastěji používají tyto soustavy:

- **L-4** pro 2 nebo 3 faktory
- **L-8** pro 4 až 7 faktorů
- **L-12** pro 8 až 11 faktorů
- **L-16** pro 8 až 15 faktorů
- **L-32** pro 16 až 31 faktorů

U tříúrovňových faktorů jsou potom k dispozici tyto nepoužívanější soustavy:

- **L-9** pro 3 až 4 faktory
- **L-18** až pro 7 faktorů
- **L-27** až pro 13 faktorů

Soustavy vyšších řádů se spíše používají pro simulační studie než pro reálné experimenty. Zvláštním případem jsou soustavy L-12 a L-18, u nichž nelze přiřadit interakce. U jiných soustav přiřazení interakcí na místo faktorů lze, ne vždy se to ale dělá.

Experimentální procedura metody DOE se skládá z pěti hlavních kroků:

- 1. Plánování experimentů**
- 2. Navrhování experimentů**
- 3. Provedení experimentů**
- 4. Analýza experimentů**
- 5. Ověřovací testy**

Každý z pěti zmíněných kroků, bude s názornou ukázkou podrobněji vysvětlen v následujících podkapitolách, aplikovaných na optimalizaci životnosti břitové destičky soustružnického nože, určeného k opracování rovinných ploch u odlitků z Al slitin, používaných v automobilním průmyslu.

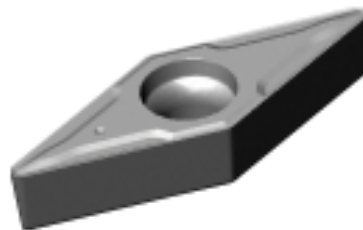
3.1. Plánování experimentů

Prvním krokem před plánováním experimentů, je sestavení experimentálního týmu o velikosti od 2 do 15 lidí. Členové tohoto týmu by měli být zástupci ze všech oddělení, která přímo ovlivňují zkoumaný produkt nebo proces. Z takto vzniklého týmu je určen jeden vedoucí týmu, který koordinuje jednotlivá sezení.

Základním prvkem pro plánování každého experimentu je brainstorming mezi členy týmu. Jednotlivá brainstormingová sezení jsou věnována řešení velkého množství otázek, na které musí experimentální tým nalézt správné odpovědi. Především se jedná o:

- **Určení cíle experimentů**
- **Definování charakteristiky jakosti**
- **Výběr faktorů a jejich úrovní**

Cílem této práce je nalezení optimálního nastavení parametrů CNC soustruhu. Konkrétně se pak jedná o optimalizaci délky životnosti výměnných břitových destiček, typu VBD VCMT 160408 BDA18, které se běžně používají k obrábění velkých rovinných ploch u odlitků z Al slitiny.



Obr. 50 Břítová destička VBD VCMT 160408 BDA18 [31]

Charakteristika jakosti bude posuzována podle počtu obrobků, které budou mít odpovídající hodnotu drsnosti obrobkové plochy.

Na základě znalosti procesu soustružení a po vzájemné dohodě s provozním technologem obrobny, byly vybrány tři hlavní faktory ovlivňující výslednou charakteristiku jakosti ve dvou úrovních:

- (A) Otáčky obrobku
 - A1 2000 Ot/min
 - A2 2200 Ot/min

- (B) Posuv nože
 - B1 200 mm/min
 - B2 396 mm/min
- (C) Koncentrace řezné kapaliny
 - C1 6%
 - C2 10%

Dolní úroveň faktorů jsou hodnoty nastavení, které se v současné době na CNC stroji běžně používají. Horní úroveň faktorů potom odpovídá maximálním hodnotám nastavení, které udává sám výrobce břitových destiček. Maximální hodnota udávaná výrobcem, byla zvolena záměrně, neboť lze předpokládat menší namáhání břitu nástroje a tím i jeho delší životnost.

3.2. Navrhování experimentů

Před samotným návrhem experimentů, je ještě nutno podotknout, že v případě metody DOE se nejedná o klasické experimenty, kdy se zkoušejí veškeré možné varianty nastavení a z nich se poté určí vhodné nastavení. Princip zkrácených zkoušek vychází z již zmíněných ortogonálních soustav, které umožňují provedení minimálního počtu experimentů tak, aby vypovídající hodnota těchto experimentů byla co nejvíce statisticky přesná. Tím se sníží potřebný čas i finanční náklady.

Po předešlém definování cíle experimentu a charakteristice jakosti, která je měřítkem pro posouzení splnění cíle, následuje návrh experimentu. V této fázi jsou přiřazeny faktory ovlivňující charakteristiku jakosti do ortogonální soustavy. Toto přiřazení je u jednoduchých experimentů, u kterých se neuvažuje s interakcemi nebo jinými modifikacemi, velmi jednoduchou záležitostí.

V případě, kdy se posuzuje vliv 3 faktorů ve dvou úrovních, by za normálních okolností bylo třeba provést 8 experimentů (2^3). Využitím Taguchicho přístupu s ohledem na finanční a časové možnosti je počet nutných experimentů snižen na 4, neboť návrh experimentů byl proveden pomocí nejmenší ortogonální soustavy L-4 se zanedbáním jednotlivých interakcí.

Tab. 2 Návrh experimentů podle L-4

<i>Sloupec</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Číslo experimentu</i>	<i>A (otáčky)</i>	<i>B (posuv)</i>	<i>C (koncentrace řezné kapaliny)</i>
<i>1</i>	1	1	1
<i>2</i>	1	2	2
<i>3</i>	2	1	2
<i>4</i>	2	2	1

Z důvodu eliminace možné chyby způsobené šumovými faktory, bylo domluveno využít prostého opakování experimentů, při kterém sice nejsou identifikovány jednotlivé nežádoucí šumové faktory, ale tyto faktory se berou jako celek, který náhodně ovlivňuje charakteristiku jakosti. Jedná se v podstatě o nejjednodušší způsob jejich eliminace. Běžně se provádí dvě až pět opakování, dle povahy projektu a rozhodnutí realizačního týmu. V případě optimalizace procesu obrábění, bylo dohodnuto provést pouze dvě opakování pro každý experiment, což by měl být z hlediska časové náročnosti dostatečný počet.

Všechny experimenty byly provedeny na CNC soustruhu typu Farma Pronto 6. Tento soustruh je automatické strojní zařízení, k jehož obsluze je třeba jen jednoho operátora, který umísťuje neobrobené díly na nosiče pásového dopravníku a po obrobení je přemisťuje do příslušných boxů, dle balícího předpisu.

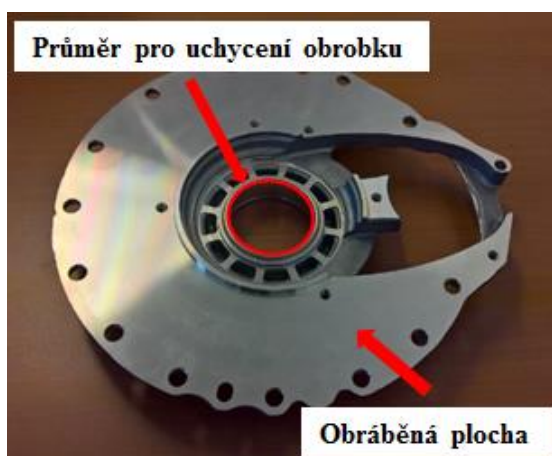


Obr. 51 Famar Pronto 6 [32]

3.2.1. Obráběný díl

K jednotlivým experimentům byly vybrány dva odlitky s interním označením 1733-00 a 1714-00, které mají stejný tvar a velikost obráběné plochy. Rozdíl obou dílů spočívá v poloze otvorů a v místě jejich výroby. Díl 1733-00 je odléván u subdodavatele ve Francii a díl 1714-00 ve slévárně Ljunghäll s.r.o. v České Republice. Tyto odlitky byly vybrány z toho důvodu, že dle záznamů údržby u nich dochází k nejčastější výměně nástrojů, a to právě při obrábění velké rovinné plochy.

Oba finální obrobky poté slouží jako díly automatických převodovek, které do svých automobilů montuje koncern Volkswagen a jejichž dodavatelem je firma ZF Friedrichshafen AG.



Obr. 52 Obrobek 1733-00

Oba odlitky jsou vyrobeny z materiálu, který je číselně označen jako EN AC-46000. Toto značení se řídí normou ČSN EN 1706, používanou společností Ljunghäll s.r.o. Obsah jednotlivých prvků ve slitině hliníku je uveden v Tab. 3:

Tab. 3 Chemické složení slitiny EN AC-46000

Chemické složení v hmotnostních %												
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Jiné	Al
8-11	1,3	2-4	0,55	0,05-0,55	0,15	0,55	1,2	0,35	0,15	0,25	0,05	Zbytek

3.2.2. Mikrostruktura obráběného materiálu

V obou případech použitých odlitků se jedná o slitinu blízkou eutektického bodu. Největší předností těchto slitin je vynikající zabíhavost, která umožňuje výrobu tenkostěnných a tvarově složitých odlitků. Tyto tzv. siluminy (silicon aluminum alloys) se běžně využívají pro lití do kovových forem, pro tlakové lití nebo pro lití do vytavitelného modelu. Tento druh slitin díky svým vlastnostem nalézá široké uplatnění především v leteckém a automobilovém průmyslu.

Mezi základní druhy legur a nečistot u slitin hliníku AlSiCu patří:

- **Křemík (Si)**

Je základním legujícím prvkem, zlepšující většinu slévárenských vlastností. Čím více křemíku je ve slitině obsaženo, tím lepší je její zabíhavost, korozivzdornost a menší tepelná roztažnost.

- **Měď (Cu)**

Legování siluminů mědí (do 5%) se provádí především pro zvýšení pevnostních charakteristik materiálu. S hliníkem potom tvoří intermetalickou fázi Al_2Cu . Měď v siluminech všeobecně zvyšuje jejich pevnost a tvrdost. Vytvrzení nastává po umělém či přirozeném stárnutí v důsledku vzniku precipitátu intermetalické fáze. Její nevýhodou je snížení korozní odolnosti materiálu.

- **Hořčík (Mg)**

V siluminech tento prvek patří k důležitým přísadám, neboť umožňuje precipitační vytvrzování slitiny. Jeho obsah bývá v rozmezí od 0,3 až do 0,7 %.

- **Železo (Fe)**

Železo patří u těchto slitin k nežádoucím prvkům, neboť zhoršuje jejich mechanické vlastnosti. Do materiálu se tento prvek běžně dostává při tavně, u které je využito druhotných surovin.

- **Nikl (Ni)**

Je prvek, přidávající se především do siluminů určených pro odlitky, které pracují při vyšších teplotách.

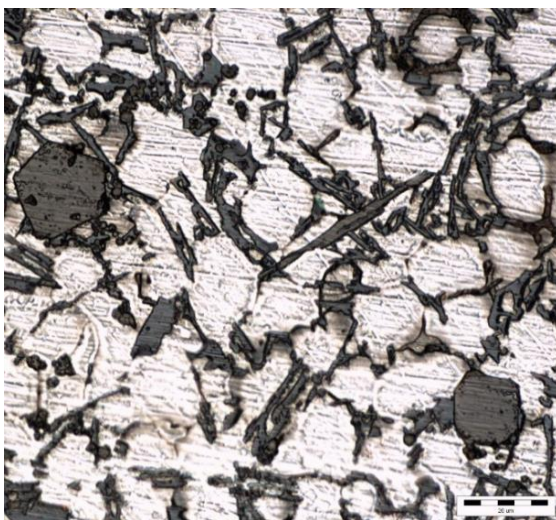
Před provedením analýzy mikrostruktur materiálu, je v první řadě potřeba vytipovat místo v odlitku, u něhož je předpoklad vzniku možných strukturálních vad. Nejčastěji se pak jedná

o místa, kde dochází ke vzniku tepelných uzlů. Po určení tohoto místa se vyřízne vzorek, jehož povrch se vyleští a pro zviditelnění mikrostruktury naleptá. Schéma odběru vzorků je uvedeno na Obr. 53. Výbrus byl proveden na metalografické brusce Buehler Beta v laboratořích VVCD a leptání mikrostruktury bylo provedeno pomocí 0,5 % kyseliny fluorovodíkové.

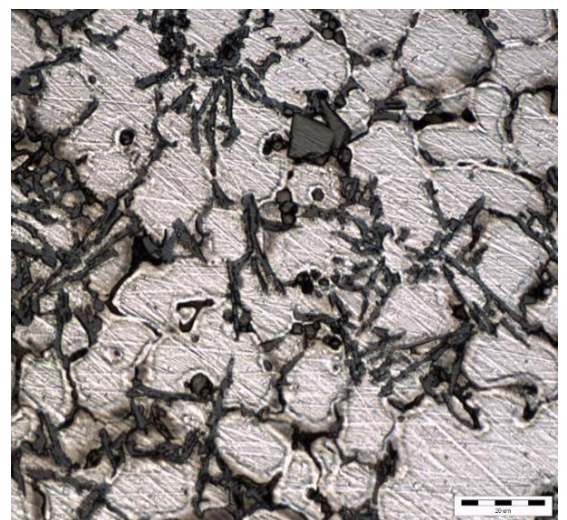


Obr. 53 Schéma odběru vzorků pro metalografii

Hodnocení vzorků, bylo provedeno pomocí inverzního metalografického mikroskopu Neophot 32 s výstupem obrazu pomocí CCD kamery Olympus ColorView III. Tvrdost byla stanovena tvrdoměrem Zwick/Roell ZHV10. Hodnocení bylo též provedeno pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu TESCAN VEGA 3 EasyProbe. Chemická mikroanalýza prvků byla prováděna pomocí EDX analyzátoru (Energiově Disperzní analýza charakteristického RTG záření) Bruker, který je součástí elektronového mikroskopu.



1733-00

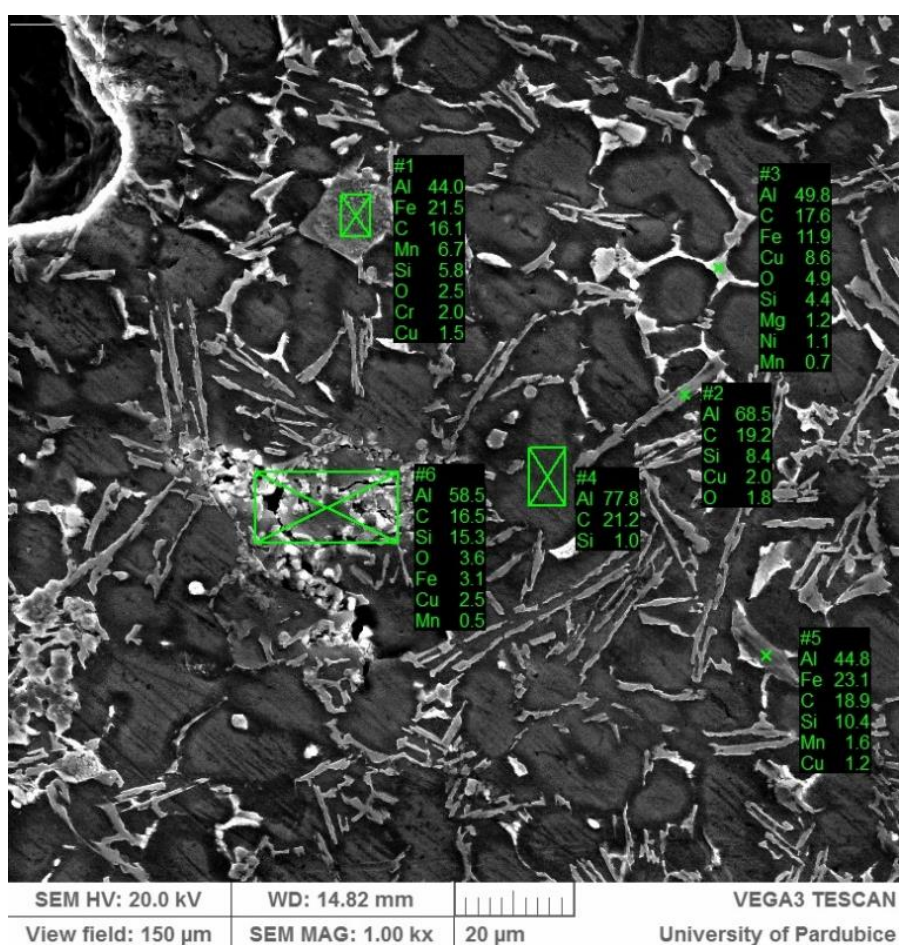


1714-00

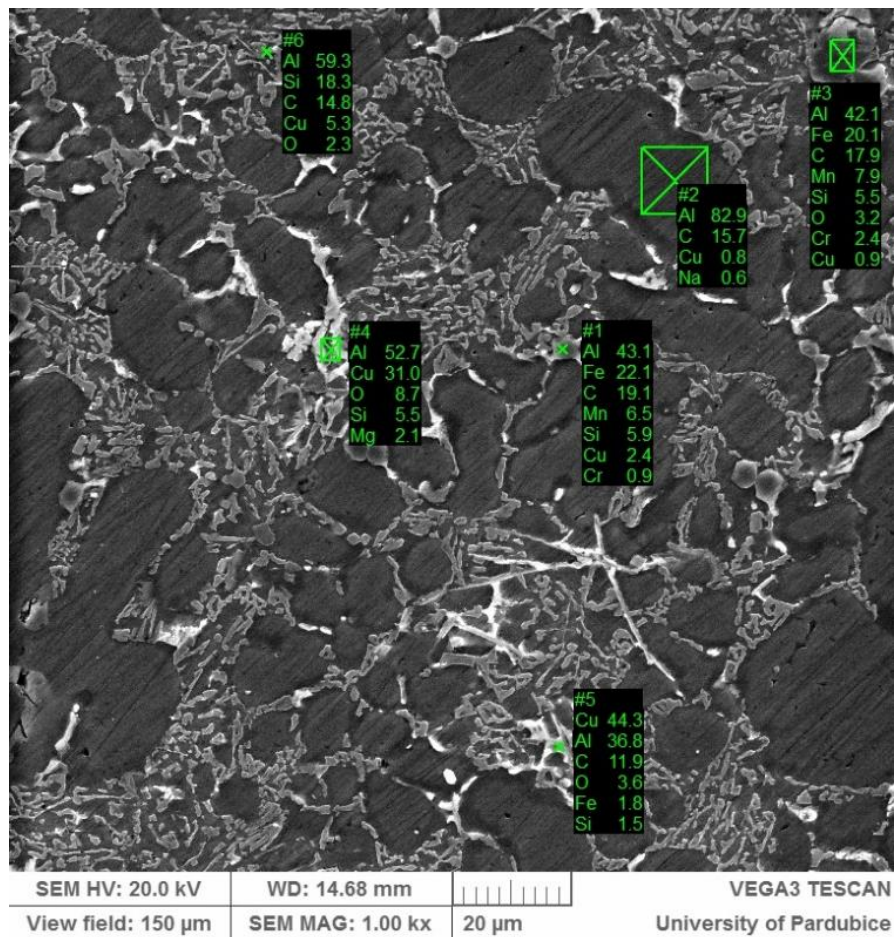
Obr. 54 Mikrostruktury odlitků; optický mikroskop; 500x

Na naleptaných vzorcích byly viditelné mikrořediny v celé ploše, a to relativně rovnoměrně rozmístěné.

Pro získání podrobných informací o mikrostruktuře materiálů, je možné identifikovat přítomné fáze prvkové mikroanalýzy (EDX). Struktura odlitků je tvořena eutektikem, kdy základní fáze je tvořena hliníkem s malým množstvím křemíku a jehlicovitou fází, která je komplexní slitinou tvořenou ostatními leguicími prvky (převážně Al, Si, Cu, Fe). Z níže uvedených obrázků je patrné, že v odlitku 1733-00 je přítomno nežádoucí železo, které je soustředěno v intermetalické fázi, která má zásadní vliv na obrobiteľnosť daných dílů, neboť zvyšuje jeho tvrdost.



Obr. 55 Detail z elektronového mikroskopu u odlitku 1733-00



Obr. 56 Detail z elektronového mikroskopu u odlitku 1714-00

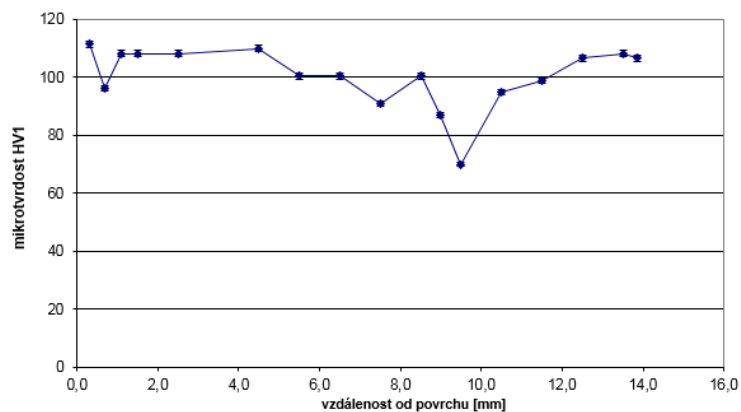
Ačkoliv se dle normy jedná o stejný materiál (pouze litý v jiných slévárnách), je z Obr. 54 zřejmé, že je u odlitků rozdílné rozložení jehlicovité eutektické fáze. Vzorek materiálu z odlitku 1733-00 má jehlicovitou fázi jemnější, než vzorek z odlitku 1714-00. Tento rozdíl ve struktuře je pak dokumentován i rozdílnou mikrotvrdostí.



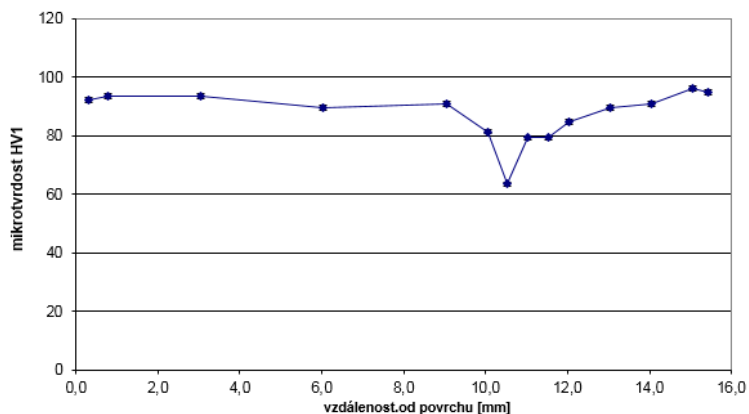
Obr. 57 Místo měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno v označené oblasti na Obr. 57. Nulová poloha měření je neopracovaná strana odlitku v místě výztužného žebra (na Obr. 57 měřeno „zdola nahoru“). Ze získaných výsledků vyplývá, že odlitek 1733-00 má mírně vyšší tvrdost. Tato skutečnost může mít vliv na výsledek provedených experimentů, neboť se dá předpokládat, že životnost břitové destičky u tohoto odlitku bude o něco kratší.

Pokles mikrotvrdomosti ve vzdálenosti cca 10 mm od povrchu je patrně v důsledku přítomnosti tepelného uzlu. Tento pokles je přítomen na obou měřených vzorcích. Naopak směrem k povrchu, kde docházelo k rychlejšímu ochlazení roztaveného materiálu, který je v kontaktu s formou, je v porovnání se střední částí tvrdost vyšší.



Obr. 58 Graf mikrotvrdomosti odlitku 1733-00



Obr. 59 Graf mikrotvrdomosti odlitku 1714-00

Veškeré materiály, které byly získány při analýze mikrostruktur obou odlitků, jsou nedílnou součástí této práce a jsou přiloženy v elektronické podobě na CD. Tato příloha obsahuje již prezentované snímky a grafy, ale také snímky mikrostruktur s různým zvětšením, které v práci prezentovány nebyly.

3.3. Provedení experimentů

Realizace experimentů probíhá buď v laboratorních, nebo přímo v provozních podmínkách. Při experimentování přímo ve výrobě, může nastat střet zájmů mezi snížením potřebného množství produkce na jedné straně a mezi časem potřebným na experimenty, který snižuje produktivní čas výroby, na straně druhé. V praxi se obvykle tento problém řeší takovým způsobem, že se experimenty provádějí mimo hlavní pracovní dobu, tj. o sobotách, nedělích nebo ve zvláštních nočních směnách.

Experimenty týkající se optimalizace životnosti břitové destičky probíhaly přímo za provozu, neboť se neočekávaly žádné velké časové změny, zapříčiněné změnou jednotlivých parametrů. Obsluha CNC strojů byla řádně proškolená ohledně sledování jakosti obráběné plochy, měla za úkol zapisovat počet obrobků připadajících na jednu břitovou destičku a v případě změny jakosti obráběné plochy, či destrukce břitové destičky, měla za úkol informovat provozního technologa obrobny, který provedl výměnu poškozeného nástroje a případně nastavil nové parametry obráběcího stroje. Na daném pracovišti byl také umístěn podrobný návod týkající se popisu celého experimentu i s místem určeným pro poznámky obsluhy.

Tab. 4 Popis jednotlivých experimentů

<i>Číslo experimentu</i>	<i>Název faktoru</i>	<i>Úroveň faktoru</i>
1.	Otáčky obrobku Posuv nože Koncentrace řezné kapaliny	2 000 ot/min 200 mm/min 6 %
2.	Otáčky obrobku Posuv nože Koncentrace řezné kapaliny	2 000 ot/min 396 mm/min 10 %
3.	Otáčky obrobku Posuv nože Koncentrace řezné kapaliny	2 200 ot/min 200 mm/min 10 %
4.	Otáčky obrobku Posuv nože Koncentrace řezné kapaliny	2 200 ot/min 396 mm/min 6 %

Z uvedeného popisu je zřejmé, že navrhování jednoduchých experimentů pomocí ortogonálních soustav je velmi snadná záležitost. Podobné experimenty nacházejí široké uplatnění především v počátečních fázích experimentování, kdy je hlavní snahou zkoumat co největší množství faktorů. Z tohoto důvodu se neuvažuje s jednotlivými interakcemi.

3.4. Analýza experimentů

Analýza výsledků z jednotlivých experimentů, spočívá v nalezení správné kombinace faktorů, která udává nejlepší výsledek a také v určení relativního podílu jednotlivých faktorů na výsledné jakosti. V závěru celé analýzy se provádí odhad výsledku při optimálním nastavení sledovaných parametrů, který se musí verifikovat ověřovacími testy. Součástí vlastní analýzy jsou poměrně rozsáhlé výpočty, zejména pak pro určení relativního podílu jednotlivých faktorů, ke kterému se používá statistická technika ANOVA, což je vlastně analýza rozptylu naměřených hodnot od hodnoty průměrné. Postupy výpočtů při různých analýzách se mohou podle povahy experimentů v některých směrech lišit.

Po realizaci všech požadovaných experimentů ve dvou opakování, byly získány počty obrobených kusů připadajících na jednu břitovou destičku při dané úrovni nastavení. V případě prvního nastavení byly však výsledky trvanlivosti nástroje značně rozdílné, navíc se lišila i příčina jejich ukončení – první opakování bylo ukončeno po obrobení 2 412 kusů, a to z důvodu nevyhovující drsnosti povrchu, druhé opakování bylo ukončeno již po obrobení 125 kusů, a to z důvodu destrukce nástroje. Z tohoto důvodu byl experiment s tímto nastavením opakován, aby se zjistilo, zda k poškození nástroje došlo z důvodu výjimečně nepříznivých vlastností odlítků, nebo zda bylo důvodem nevhodné nastavení parametrů. Pro další výpočet pak byly použity výsledky z nově provedeného experimentu, jehož výsledky jsou uvedeny v Tab. 5 s ostatními výsledky.

Tab. 5 Výsledky experimentů

Číslo experimentu	Výsledek Y [počet obroběných kusů]				Průměrný počet kusů
	1. opakování		2. opakování		
	Důvod ukončení	Počet kusů	Důvod ukončení	Počet kusů	
1.	Nevyhovující drsnost	2 368	Nevyhovující drsnost	2 443	2 405,5
2.	Destrukce nástroje	146	Destrukce nástroje	153	149,5
3.	Nevyhovující drsnost	2 508	Nevyhovující drsnost	2 295	2 401,5
4.	Nevyhovující drsnost	2 102	Nevyhovující drsnost	2 167	2 134,5

3.4.1. Výpočet hlavních účinků faktorů (stanovení optimální kombinace faktorů)

Pro výpočet hlavních účinků jednotlivých faktorů, je třeba nejdříve vypočítat průměrný účinek každého faktoru v obou úrovních. To znamená sečíst výsledky všech experimentů, ve kterých se posuzovaný faktor v dané úrovni objevoval a podělit je počtem takových experimentů. Hlavní účinek faktoru je potom dán rozdílem mezi dvěma průměrnými účinky faktoru v obou úrovních.

Průměrný účinek faktorů:

$$A1_{\text{průměrný}} = \frac{Y_1 + Y_2}{2} = \frac{2\,405,5 + 149,5}{2} = 1\,277,5 \quad (1)$$

$$A2_{\text{průměrný}} = \frac{Y_3 + Y_4}{2} = \frac{2\,401,5 + 2\,134,5}{2} = 2\,268 \quad (2)$$

$$B1_{\text{průměrný}} = \frac{Y_1 + Y_3}{2} = \frac{2\,405,5 + 2\,401,5}{2} = 2\,403,5 \quad (3)$$

$$B2_{\text{průměrný}} = \frac{Y_2 + Y_4}{2} = \frac{149,5 + 2\,134,5}{2} = 1\,142 \quad (4)$$

$$C1_{\text{průměrný}} = \frac{Y_1 + Y_4}{2} = \frac{2\,405,5 + 2\,134,5}{2} = 2\,270 \quad (5)$$

$$C2_{\text{průměrný}} = \frac{Y_2 + Y_3}{2} = \frac{149,5 + 2\,401,5}{2} = 1\,275,5 \quad (6)$$

Hlavní účinek faktorů:

$$A_{HL.účinek} = A2_{průměrný} - A1_{průměrný} = 2\,268 - 1\,277,5 = 990,5 \quad (7)$$

$$B_{HL.účinek} = B2_{průměrný} - B1_{průměrný} = 1\,142 - 2\,403,5 = -1\,261,5 \quad (8)$$

$$C_{HL.účinek} = C2_{průměrný} - C1_{průměrný} = 1\,275,5 - 2\,270 = -994,5 \quad (9)$$

Vypočtené výsledky, jsou poté přehledně seřazeny v Tab. 6. Všeobecně platí, že čím vyšší je číslo hlavního účinku, tím větší vliv daný faktor má. Druh znaménka potom značí, zdali změnou faktoru z úrovně 1 na úroveň 2 se výsledek zlepšuje (kladné znaménko), nebo zhoršuje (záporné znaménko).

Tab. 6 Hlavní účinky faktorů

Název faktoru	Průměrný účinek úrovně 1	Průměrný účinek úrovně 2	Hlavní účinek
<i>A – Otáčky obrobku</i>	1 277,5	2 268	990,5
<i>B – Posuv nože</i>	2 403,5	1 142	-1 261,5
<i>C – Koncentrace řezné kapaliny</i>	2 270	1 275,5	-994,5

Jelikož platí, že čím je charakteristika jakosti větší, tím je lepší, hledáme v Tab. 6 vždy největší hodnotu průměrného účinku, odpovídající dané úrovni faktoru. Kombinace takto určených faktorů s nejlepším výsledkem (pravděpodobné optimum) je poté znázorněna v Tab. 7:

Tab. 7 Výsledky pravděpodobného optimálního nastavení faktorů

Název faktoru	Úroveň faktoru
<i>A2 – Otáčky obrobku</i>	2 200 ot/min
<i>B1 – Posuv nože</i>	200 mm/min
<i>C1 – Koncentrace řezné kapaliny</i>	6 %

3.4.2. Výpočet relativního podílu vlivu jednotlivých faktorů

Při výpočtu relativního podílu vlivu jednotlivých faktorů (ANOVA) je dobré dodržovat logickou souslednost jednotlivých výpočtů tak, jak je naznačeno v následující části:

- 1) Celkový součet všech získaných výsledků T

$$T = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \quad (10)$$

$$T = 2\,405,5 + 149,5 + 2\,401,5 + 2\,134,5$$

$$T = 7\,091$$

- 2) Korekční faktor C.F.

$$C.F. = \frac{T^2}{4} \quad (11)$$

$$C.F. = \frac{7\,091^2}{4}$$

$$C.F. = 12\,570\,570,25$$

- 3) Celkový součet čtverců S_T

$$S_T = \sum y_i^2 - C.F. \quad (12)$$

$$S_T = (2\,405,5^2 + 149,5^2 + 2\,401,5^2 + 2\,134,5^2) - 12\,570\,570,25$$

$$S_T = 3\,561\,502,75$$

- 4) Součet čtverců pro jednotlivé faktory

$$S_A = \frac{A_1^2}{2} + \frac{A_2^2}{2} - C.F. \quad (13)$$

$$S_A = \frac{(Y_1 + Y_2)^2}{2} + \frac{(Y_3 + Y_4)^2}{2} - C.F.$$

$$S_A = \frac{(2\,405,5 + 149,5)^2}{2} + \frac{(2\,401,5 + 2\,134,5)^2}{2} - 12\,570\,570,25$$

$$S_A = 981\,090,25$$

$$S_B = \frac{B_1^2}{2} + \frac{B_2^2}{2} - C.F. \quad (14)$$

$$S_B = \frac{(Y_1 + Y_3)^2}{2} + \frac{(Y_2 + Y_4)^2}{2} - C.F.$$

$$S_B = \frac{(2\,405,5 + 2\,401,5)^2}{2} + \frac{(149,5 + 2\,134,5)^2}{2} - 12\,570\,570,25$$

$$S_B = 1\,591\,382,25$$

$$S_C = \frac{C_1^2}{2} + \frac{C_2^2}{2} - C \cdot F \quad (15)$$

$$S_C = \frac{(Y_1 + Y_4)^2}{2} + \frac{(Y_2 + Y_3)^2}{2} - C \cdot F$$

$$S_C = \frac{(2\,405,5 + 2\,134,5)^2}{2} + \frac{(149,5 + 2\,401,5)^2}{2} - 12\,570\,570,25$$

$$S_C = 989\,030,25$$

Kde A_1, A_2 (B_1, B_2 nebo C_1, C_2) je součet charakteristik jakosti, které jsou ovlivňovány parametrem A (B nebo C) v obou úrovních.

5) Celkový počet stupňů volnosti f_T

$$f_T = n - 1 \quad \text{kde „n“ označuje celkový počet experimentů} \quad (16)$$

$$f_T = 4 - 1 = 3$$

6) Stupně volnosti pro faktory f_i

$$f_i = \text{počet úrovní sledovaných faktorů} - 1 \quad (17)$$

$$f_A = 2 - 1 = 1$$

$$f_B = 2 - 1 = 1$$

$$f_C = 2 - 1 = 1$$

7) Průměrný čtverec (rozptyl)

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} \quad (18)$$

$$V_A = \frac{981\,090,25}{1}$$

$$V_A = 981\,090,25$$

$$V_B = \frac{S_B}{f_B} \quad (19)$$

$$V_B = \frac{1\,591\,382,25}{1}$$

$$V_B = 1\,591\,382,25$$

$$V_C = \frac{S_C}{f_C} \quad (20)$$

$$V_C = \frac{989\,030,25}{1}$$

$$V_C = 989\,030,25$$

8) Procentuální podíl jednotlivých faktorů

$$P_A = \left(\frac{S_A}{S_T} \right) * 100 \quad (21)$$

$$P_A = \left(\frac{981\,090,25}{3\,561\,502,75} \right) * 100$$

$$P_A = 27,55 \%$$

$$P_B = \left(\frac{S_B}{S_T} \right) * 100 \quad (22)$$

$$P_B = \left(\frac{1\,591\,382,25}{3\,561\,502,75} \right) * 100$$

$$P_B = 44,68 \%$$

$$P_C = \left(\frac{S_C}{S_T} \right) * 100 \quad (23)$$

$$P_C = \left(\frac{989\,030,25}{3\,561\,502,75} \right) * 100$$

$$P_C = 27,77 \%$$

Pro lepší přehlednost jsou získané hodnoty z výpočtu relativního podílu vlivu jednotlivých faktorů znázorněné v Tab. 8:

Tab. 8 Výsledná tabulka ANOVA

Název faktoru	f Stupeň volnosti	S Součet čtverců	V Průměrný čtverec	P Procentuální podíl
<i>A – Otáčky obrobku</i>	1	981 090,25	981 090,25	27,55
<i>B – Posuv nože</i>	1	1 591 382,25	1 591 382,25	44,68
<i>C – koncentrace řezné kapaliny</i>	1	989 030,25	989 030,25	27,77
<i>Celkem</i>	3	3 561 502,75	3 561 502,75	100

Z uvedené tabulky vyplývá, že na životnost břitové destičky z pohledu „počtu obrobených kusů“, má největší vliv posuv nože a to 44,68 %. Nejmenší vliv mají potom otáčky obrobku s 27,55 %.

Získané výsledky také ukazují velmi silný vliv koncentrace řezné kapaliny, což je důležitý poznatek pro vlastní proces. Z analýzy potom jasně vyplývá, že je vhodnější použít řeznou kapalinu o nižší koncentraci, u které je důležitější chladicí účinek než účinek mazací. Z tohoto důvodu by nebylo od věci vyzkoušet jinou procesní kapalinu, a to třeba na bázi vody. V případě kladných výsledků by mohlo dojít ke značnému zefektivnění procesu – mimo jiné by odpadly problémy s ekologickou likvidací řezné emulze.

3.4.3. Odhad výsledku při optimálních podmínkách

Odhad výsledné jakosti při optimálním nastavení se provádí tak, že se vypočte průměrný výsledek pro celý experiment a k němu se poté přičtou přínosy jednotlivých faktorů (při nastavení na optimální hodnotu). Po stanovení výsledné jakosti lze provést i další statistické výpočty, pomocí kterých se stanoví tolerance (interval spolehlivosti) okolo předpokládané hodnoty, ve které by se měly pohybovat s předem stanovenou pravděpodobností výsledky ověřovacích testů. Pokud tyto testy potvrdí vypočtenou životnost, lze takto určené optimální nastavení použít i v sériové výrobě.

Při výpočtu výsledné jakosti (životnosti) se vychází ze zjištěných hodnot optimálního nastavení jednotlivých faktorů, které jsou uvedeny v Tab.7.

- 1) Výpočet průměrné jakosti (průměrná životnost ze všech experimentů)

$$Y_{prům.} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4} \quad (24)$$

$$Y_{prům.} = \frac{2\ 405,5 + 149,5 + 2\ 401,5 + 2\ 134,5}{4}$$

$$Y_{prům.} = 1\ 772,75$$

- 2) Výpočet výsledné jakosti (předpokládaná životnost při optimálním nastavení)

$$Y_{opt.} = Y_{prům.} + (A2 - Y_{prům.}) + (B1 - Y_{prům.}) + (C1 - Y_{prům.}) \quad (25)$$

$$Y_{opt.} = 1\ 772,75 + (2\ 268 - 1\ 772,75) + (2\ 403,5 - 1\ 772,75) + (2\ 270 - 1\ 772,75)$$

$$Y_{opt.} = 3\ 396$$

Z uvedeného výpočtu výsledné jakosti vyplývá, že při zjištěném optimálním nastavení faktorů, bude předpokládaná životnost břitové destičky (charakteristika jakosti) 3 396 obroběných kusů.

3.5. Ověřovací testy

Po výpočtu předpokládané životnosti břitové destičky soustružnického nože, je třeba provést tzv. ověřovací testy, které jsou nedílnou součástí metody DOE. Těmito testy se ověří, zda jsou závěry z provedené analýzy správné.

Aby byla zajištěna dostatečná prokazatelnost těchto testů, probíhaly tyto testy na stejném obráběcím stroji a na stejných odlitcích, jako tomu bylo u předchozích experimentů. Nastavení jednotlivých faktorů je potom znázorněno v Tab. 9.

Tab. 9 Popis ověřovacích testů

Název faktoru	Úroveň faktoru
<i>Otáčky obrobku</i>	2 200 ot/min
<i>Posuv nože</i>	200 mm/min
<i>Koncentrace řezné kapaliny</i>	6 %

3.5.1. Vyhodnocení ověřovacích testů

Vyhodnocení ověřovacích testů, bylo provedeno podle stejné charakteristiky jakosti, jako tomu bylo u předešlých experimentů, a to podle počtu obrobených kusů.

Provedením těchto testů byly získány následující výsledky, které jsou přehledně uvedeny v Tab. 10:

Tab. 10 Výsledky ověřovacích testů

Výsledek ověřovacích testů [počet obrobených kusů]				
1. opakování		2. opakování		Průměrný počet kusů
Důvod ukončení	Počet kusů	Důvod ukončení	Počet kusů	
Nevyhovující drsnost	3 349	Nevyhovující drsnost	3 217	3 283

Srovnáním takto dosažených hodnot s hodnotami vypočtenými, lze prohlásit experiment a jeho vyhodnocení za uspokojivé. Počet obrobených kusů je sice o něco málo nižší, než vyšlo výpočtem, ale chyba dosahuje pouze 3,32 %, což je u takto náročné obráběcí operace přijatelný výsledek. Hlavní problém v obrábění hliníkových odlitků spočívá v nehomogenitě materiálu, což lze do určité míry ovlivnit změnou parametrů procesu lití, ale jen v určitém rozmezí. U čelního obrábění dílů s velkým průměrem dochází také k nedodržení doporučené řezné rychlosti. V mnou provedených experimentech se řezná rychlost měnila od 35,6 do 13,1 m.s⁻¹, což je značný rozdíl. V technické praxi bývá často doporučeno, aby se řezná rychlost neodchylovala o více než 10 % od doporučené řezné rychlosti pro dané řezné podmínky.

Vzhledem k tomu, že analýzou DOE bylo zjištěno, že největší vliv na životnost břitové destičky má posuv nože, který je odvozen od otáček (bývá počítán jako milimetr na otáčku), lze mnou zjištěný výsledek považovat za uspokojivý. Na základě provedených experimentů a výsledků z ověřovacích testů lze doporučit, aby byla přehodnocena strategie obrábění. Jelikož je obrábění prováděno na CNC soustruhu, bude hlavní doporučení spočívat v postupné změně posuvu a otáček během procesu obrábění, a to alespoň ve 3 úrovních. Tím bude dosaženo, že se řezné podmínky budou více blížit doporučeným hodnotám řezné rychlosti a posuvu pro daný materiál břitových destiček.

4. Závěr

Výroba stále složitějších výrobků vede ke zvyšujícím se požadavkům na technologii obrábění. Hlavní snahou je proto zajistit takový proces obrábění, který bude efektivní a zároveň finančně nenáročný. Z těchto důvodů dochází ke zdokonalování jednotlivých typů obrábění, ale také k vývoji nových dokonalejších nástrojů, které umožní zvyšovat řezné podmínky nebo slučovat jednotlivé operace obrábění do jednoho celku. Pro lepší pochopení celé problematiky týkající se procesu obrábění, byla úvodní část této práce zaměřena na ukázkou jednotlivých druhů konvenčních a nekonvenčních způsobů obrábění, ale také na vysvětlení jejich principu a ukázkou jejich možného využití v praxi.

Efektivního procesu obrábění lze do jisté míry dosáhnout i správným nastavením regulovatelných faktorů, které celý proces značně ovlivňují. Jeden z možných způsobů, jak toho dosáhnout, je pomocí nejpoužívanější experimentální metody DOE. Tato metoda je v praktické části této práce využita při optimalizaci délky životnosti břitové destičky soustružnického nože.

V práci jsou výše zmíněné postupy použity pro optimalizaci obráběcího procesu u hliníkového odlitku, který slouží jako středící deska pro uchycení ložiska, ve kterém je vedena hřídel do 8 stupňové automatické převodovky, kterou ve svých vozech používá koncern Volkswagen.

Prvním důležitým krokem před provedením samotných experimentů bylo určení takových faktorů, které mají zásadní vliv na životnost nástroje a návrh jejich možných úrovní nastavení. Následně jsem si pomocí ortogonálních soustav určil nejmenší možný počet experimentů, které jsem zrealizoval ve dvou opakování. Analýzou výsledků jsem zjistil, že největší vliv na životnost nástroje má posuv nože 44,6 %, vliv koncentrace řezné kapaliny a otáček obrobku je téměř srovnatelný - 27,8 % pro koncentraci řezné kapaliny a 27,6 % pro otáčky obrobku. Díky výpočtu průměrného účinku jednotlivých faktorů jsem určil optimální nastavení mnou posuzovaných parametrů, které jsem dále vyzkoušel v ověřovacích testech.

Provedením ověřovacích testů a následným porovnáním takto získaných hodnot s hodnotami vypočtenými jsem zjistil, že získané výsledky velmi dobře odpovídají vypočteným hodnotám optimalizované životnosti nástroje. Z důvodu velké změny řezné rychlosti u čelního obrábění rovinných ploch odlitků se mnou získané hodnoty zcela přesně neshodují. V technické praxi se uvádí, že změna řezné rychlosti by neměla být větší než 10 %. V mnou provedených experimentech se ale řezná rychlost měnila od 35,6 do 13,1 m.s⁻¹, což je značný rozdíl. Proto bude hlavní doporučení spočívat v postupné změně otáček obrobku, nebo posuvu nože během

procesu obrábění, a to alespoň ve 3 úrovních. Tímto způsobem bude dosaženo menšího namáhání a delší životnosti břitové destičky.

Dále jsem si také ověřil, že je možné využívat metodu DOE s Taguchiho plánováním experimentů i v technologickém postupu při obrábění dílů. Výše uvedený postup bude navržen k dalšímu možnému využití ve výrobě společnosti Ljunghäll s.r.o. Tím se získá další možný nástroj, který v některých případech zjednoduší postupy optimalizace výrobních procesů.

Seznam použité literatury

- [1] GSCHEIDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. 2. vyd. Praha 1: Sobotáles, 2002, 652 s. ISBN 80-85920-83-2.
- [2] ŠVANDA, Pavel. *Nekonvenční obrábění: Řezání*. Pardubice. Prezentace. Dopravní fakulta Jana Pernera Pardubice.
- [3] BAČKOVSKÝ, Lukáš. *Obrábění: Sekání*. Pardubice, 2009. Prezentace. Dopravní fakulta Jana Pernera Pardubice.
- [4] Výukový materiál pro žáky. *Technická dokumentace* [online]. , 39 [cit. 2016-10-09]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/41797-Vyukovy-material-pro-zaky.html>
- [5] Technologie: část II. *OMTO* [online]. 2010/2011, 110 [cit. 2016-10-09]. Dostupné z: <http://www.isstechn.cz/objekty/st2.pdf>
- [6] Broušení. *ZOZEI* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://zoei.sssebrno.cz/brouseni---podstata-brousici-nastroje-tvary-a-znaceni-kotoucu/>
- [7] Soustružení. *ELUC* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1823>
- [8] Podstata frézování. *Střední škola průmyslová a umělecká Opava* [online]. 2012 [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablony/Praxe_II_a_III/VY_52_INOVACE_H-02-20.pdf
- [9] Universální frézovací hlavy. *ELGLOBAL* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <https://www.elglobal.cz/universalni-frezovaci-hlavy>
- [10] Fazetka vrtáku. *Vrbovský s.r.o.* [online]. [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://vrtaky-vrbovsky.cz/fazetka-vrtaku>

- [11] Záhlučník s válcovou stopkou a vodícím čepem. *StimZet* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: http://stimzet.cz/data/csn221604_cz.html
- [12] Záhlučník 221627 HSS kuželový. In: *NAKOL s.r.o.* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.nakol.cz/zahlubnik-221627-hss-kuzelovy-60-90-120-s-valcovou-stopkou>
- [13] STRNAD, Josef. *Strojní obrábění - teorie obrábění* [online]. Vysoké Mýto, 2013 [cit. 2016-10-11]. Dostupné z: http://www.isstvm.cz/sites/default/files/stranka/185/vy_32_inovace_stt_2s_st_18_13_protahovani_a_protlacovani.doc. Druh učebního materiálu Textový soubor - Word. Integrovaná střední škola technická, Vysoké Mýto.
- [14] MIČÍKOVÁ, Iveta. *Strojní obrábění: Protahování a protlačování I.* [online]. Havířov-Šumbark [cit. 2016-10-11]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2591230/>
- [15] Nástroje pro soustružení. *Nářadí a nástroje s.r.o.* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: http://naradinastrojeuh.cz/nastroje_soustruzeni.php
- [16] Elektroerozivní obrábění. *Nekonvenční způsoby obrábění* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
- [17] Obrábění paprskem iontů – plazmatem. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2008/10 [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>
- [18] Obrábění laserem. *ELUC* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1423>
- [19] Obráběním paprskem elektronů. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2008/6 [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2.html>
- [20] Hloubení otvorů malých průměrů. *ELUC* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1408>

- [21] Leptání. *ELUC* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1415>
- [22] Obrábění ultrazvukem. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2007/12 [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-3-dil.html>
- [23] Řezání vodním paprskem. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2008/7 [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>
- [24] Dokončovací způsoby obrábění. *Střední škola technická Opava* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: http://sst.opava.cz/pernikar/nove_www/nekonvencni_soubory/superfinisovani1.htm
- [25] Výbrusy válců. *Motocentrum Olešná* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://vybrusyvalcu.cz/tag/brouseni-valcu/>
- [26] Lapování. *ELUC* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1385>
- [27] ENTFETTEN & GLEITSCHLEIFEN. *GRAMMDORF* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.grammdorf-stuttgart.de/produkte/entfetten-glattschleifen/>
- [28] Tryskací kabina Normfinish NP12. *ABRANOVA* [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://abranova.cz/tryskaci-kabina-mokra-cesta>
- [29] ŠVANDA, Pavel. *Lití kovu: Tlakové lití*. Univerzita Pardubice, 2012.
- [30] ČSN EN ISO 8785. *Geometrické požadavky na výrobky: Nedokonalosti povrchu - termíny, definice a parametry*. Praha 1: Český normalizační institut, 2000.
- [31] Výměnné břitové destičky VBMT. *Habilis Steel* [online]. 2016 [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: <https://www.kovoobrabeci-nastroje.cz/katalog/soustruzeni-6/soustr.-noze-s-vbd-52/britove-desticky-57/tvar-v-soustruznicke-498/vymenne-britove-desticky-vbmt-501/>

[32] CNC. *Farma Pronto 6* [online]. [cit. 2016-10-27]. Dostupné z:
<http://famargroup.com/en/products/pronto-6>

[33] PTÁČEK, CSC. AKOLEKTIV, Prof. Ing. Luděk. *Nauka o materiálu 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. ISBN 80-7204-193-2.

[34] PTÁČEK, CSC. AKOLEKTIV, Prof. Ing. Luděk. *Nauka o materiálu 2*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. ISBN 80-7204-130-4.

[35] KAUFMAN, J. GILBERT; ROOY, ELWIN L. *Aluminum Alloy Castings - Properties, Processes, and Applications*. ASM International, 2004. ISBN 978-0-87170-803-8.

[36] KONEČNÝ, Michal. *Parametry jakosti svařování vysokopevnostních materiálů při stavbě automobilu*. Pardubice, 2009. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Schmidová, Ph. D.