



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Vysokotlaké chlazení řezného procesu

High pressure cooling of the cutting process

Bakalářská práce

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Vedoucí práce: Ing. Pavel Zeman Ph.D.

Matej Kachnič

Praha 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kachnič** Jméno: **Matej** Osobní číslo: **437114**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vysokotlaké chlazení řezného procesu

Název bakalářské práce anglicky:

High pressure cooling of the cutting process

Pokyny pro vypracování:

- 1, Obecný přehled řezných prostředí a jejich účinků
- 2, Definice oblasti vysokotlakého chlazení
- 3, Aktuální vědecké poznatky v dané oblasti
- 4, Kritické zhodnocení účinků na řezný proces

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

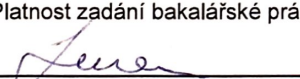
Ing. Pavel Zeman Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

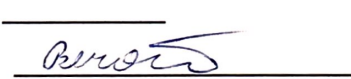
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

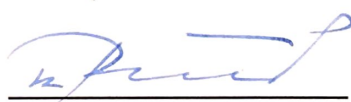
Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce

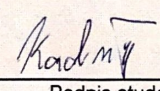

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

27.4.2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá problematikou vysokotlakového chladenia procesnou kvapalinou pri obrábaní s cieľom kritického zhodnotenia účinkov na rezný proces.

Prvá časť práce sa venuje teoretickému rozboru rezných prostredí so zameraním na procesné kvapaliny. Ďalšia časť sa už zaoberá definíciou vysokotlakového chladenia a výrobcami nástrojov venujúcimi sa tejto problematike. V práci sú spomenuté mnohé publikácie a experimenty skúmajúce chladenie rezného procesu kvapalinou pod vysokým tlakom. V závere sú kriticky zhodnotené všetky podstatné zistenia a je navrhnutý experiment, ktorý by objektívne preukázal pravdivosť týchto zistení.

Kľúčové slová

rezné prostredie, procesné kvapaliny, vysokotlakové chladenie, obrábanie, vplyv vysokotlakového chladenia

Abstract

High pressure cooling with process fluid in the machining is a case study of this thesis. The goal is critical evaluation effect on the cutting process.

First part of the thesis deals with teoretical analysis cutting environment with focus on the process fluids. Next part handles with definition of the high pressure cooling and tool manufacturers of this subject. Lot of the publications and experiments examine cooling of the cutting process under the high pressure are mentioned. In the conclusion all significant findings are critically evaluated. An experiment objectively showing veracity of the data is proposed.

Keywords

cutting environment, process fluids, high pressure cooling, machining, high pressure cooling effect

Vyhlasenie

Vyhlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracoval samostatne. Ďalej vyhlasujem, že som všetky použité zdroje správne a úplne citoval, a uvádzam ich v priloženom zozname použitej literatúry.

V Prahe dňa.....

podpis:.....

Pod'akovanie

Rád by som pod'akoval vedúcemu svojej bakalárskej práce Ing. Pavlovi Zemanovi Ph.D. za odborný dohľad, trpezlivosť a cenné rady pri písaní tejto práce.

Obsah

ÚVOD	8
1. REZNÉ PROSTREDIE	8
1.1. ROZDELENIE REZNÝCH PROSTREDÍ.....	9
1.1.1. Tuhé mazivá.....	9
1.1.2. Procesné (rezné) kvapaliny.....	10
1.1.3. Procesné plyny.....	10
1.2. PROCESNÉ KVAPALINY	14
1.2.1. Typy procesných kvapalín	14
1.2.2. Účinky procesných kvapalín.....	15
1.2.3. Vlastnosti procesných kvapalín.....	17
1.2.4. Voľba procesnej kvapaliny.....	18
1.2.5. Prívod procesnej kvapaliny	20
2. VYSOKOTLAKOVÉ CHLADENIE	23
2.1. PRINCÍP.....	23
2.2. VYUŽITIE	24
2.3. VYSOKOTLAKOVÉ CHLADIACE SYSTÉMY.....	25
2.4. VÝROBCOVIA NÁSTROJOV VYUŽÍVAJÚCI VYSOKOTLAKOVÉ CHLADENIE	27
2.4.1. Sandvik Coromant	28
2.4.2. Iscar	29
2.4.3. Seco tools	31
2.4.4. Walter tools.....	31
2.5. DEFINÍCIA VYSOKOTLAKOVÉHO CHLADENIA Z POHLADU VÝROBCOV NÁSTROJOV	32
3. VEDECKÉ POZNATKY A ZISTENIA.....	34
3.1. VPLYVY VYSOKOTLAKOVÉHO CHLADENIA	36
3.1.1. Vplyv na rezné sily.....	36
3.1.2. Vplyv na drsnosť povrchu.....	37
3.1.3. Vplyv na opotrebenie nástroja.....	39
3.1.4. Vplyv na tvorbu triesky.....	45
3.1.5. Vplyv na teplotu.....	49
3.2. ZHODNOTENIE ÚČINKOV NA REZNÝ PROCES	51
4. NÁVRH EXPERIMENTU	53
ZÁVER.....	55
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	56

Úvod

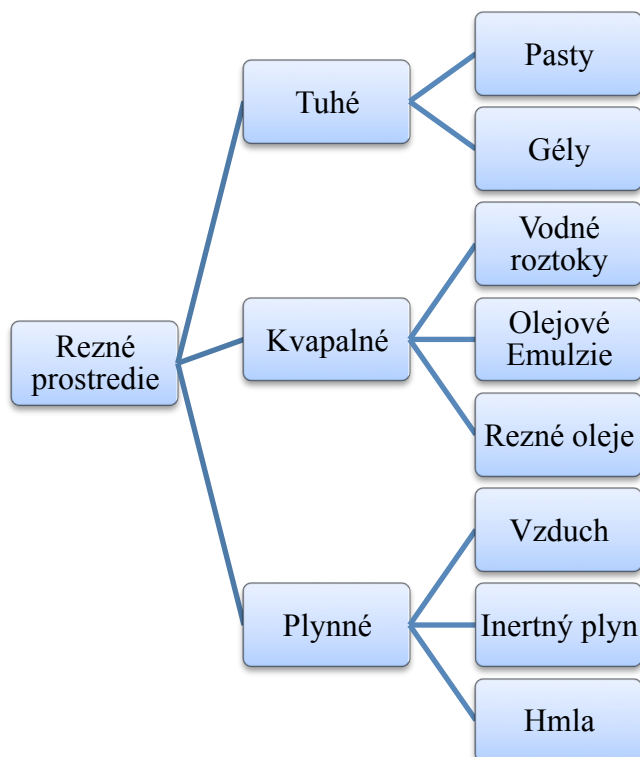
Technológia obrábania je odvetvie strojárkeho priemyslu, ktoré sa neustále vyvíja a napreduje, či už sa jedná o obrábacie stroje, rezné nástroje a samozrejme rezné médium. V dnešnej dobe je trendom predovšetkým zvyšovanie rezných rýchlostí a tým spojená efektívnejšia výroba. K navyšovaniu rezných rýchlostí dochádza aj pri obrábaní húževnatých zliatin, napríklad Titánu. Tento rozvoj so sebou nesie aj nové stratégie pri obrábaní. V dnešnej dobe je už úplne bežné použitie rezného prostredia.

1. Rezné prostredie

Obrábanie prebieha vždy v určitom reznom prostredí. Prirodzeným prostredím je vzduch, umelým môže byť iný plyn, hmla či rezná kvapalina. Toto prostredie má významný vplyv na kvantitatívne, kvalitatívne a taktiež ekonomické parametre rezného procesu. Voľba vhodného média na rezné prostredie je veľmi dôležitá. Správnym výberom média je možné dosiahnuť oveľa lepších vlastností pri obrábaní. Ide predovšetkým o nárast trvanlivosti britu, zlepšenie akosti povrchu, zníženie tepelných deformácií či uľahčenie odstraňovania triesok z miesta rezu.

1.1. Rozdelenie rezných prostredí

Medzi rezné média patrí:



1.1.1. Tuhé mazivá

Tuhé mazivá sú najmenej používané rezné prostredie. Jedná sa o pevné látky, predovšetkým rezné pasty či gély. Moderné rezné pasty sú rozpustné vo vode a sú schopné vytvoriť mazací film, ktorý je odolný aj pri obťažných podmienkach. Tento typ rezného prostredia sa používa aj pri brúsiacich operáciách.

1.1.2. Procesné (rezné) kvapaliny

Procesné kvapaliny sa stali najviac prínosným médiom pri obrábaní. Splňujú základné požiadavky na trvanlivosť nástroja a akosť obrobeného povrchu. Efektívne odvádzajú teplo z miesta rezu a znižujú trenie. Okrem vyššie spomenutých vlastností taktiež vynikajú dobrým čistiacim účinkom, čo z nich robí najpoužívanejšie rezné prostredie pri obrábaní. Kvapaliny možno rozdeliť na syntetické a polysyntetické. Chemické (syntetické) kvapaliny sú používané ako účinné chladidlá a niekedy aj lubrikanty, a skladajú sa z neorganických, a iných materiálov, rozpustných vo vode. Polychemické (polysyntetické) kvapaliny sa skladajú z 5 až 50% minerálnych olejov a syntetických zložiek [1]. Prevažuje vysoký lubrikačný výkon a ich oblasť použitia je predovšetkým pri obrábaní za náročných podmienok a tiež pri brúsiacich operáciách.

Použitie rezných olejov je menej frekventované a obtiažnejšie, a teda toto médium sa nepoužíva tak frekventovane ako procesné kvapaliny. Použitie rezných olejov je opodstatnené predovšetkým pri obrábaní s nízkymi teplotami rezania. Mazací účinok niekoľkonásobne prevyšuje ten chladiaci.

1.1.3. Procesné plyny

Plynné látky ako rezné médium sa bežne nepoužívajú. Je to spôsobené hlavne kvôli relatívne nízkemu chladiacemu účinku a problematickému čistiacemu účinku [1]. Plynné rezné prostredie sa používa predovšetkým v prípadoch, kedy sa vyskytuje problém s penetráciou reznej kvapaliny do materiálu nástroja alebo obrobku. Plynné rezné médium obecné delíme na:

- Vzduch
 - Upravený
 - Neupravený
- Inertný plyn
- Hmla

Pri obrábaní bez chladenia je rezným prostredím neupravený vzduch. Ten je síce braný ako samozrejmosť, no poskytuje účinné mazanie. Avšak, neposkytuje takmer žiadny chladiaci účinok a teda ako o chladive uvažovať nemožno.

- Vzduch

Pre zlepšenie chladiacich vlastností je potrebná úprava vzduchu. Jedná sa o filtrovanie, stlačenie, vysušenie a taktiež o ochladenie. Pomerne rozšírené je dodávanie chladeného, či mrazeného vzduchu do miesta rezu. Ide o jednoduchý a pomerne lacný spôsob úpravy. Vzduch je do miesta rezu dodávaný zariadením, takzvanou vírivou trubicou. Najväčšou výhodou tohto zariadenia, okrem samozrejme účinného chladenia je skutočnosť, že sa jedná o jednoduché externé zariadenie, pričom jeho inštalácia na akýkoľvek obrábací stroj je relatívne jednoduchá. Využitie chladeného či mrazeného vzduchu je predovšetkým pri brúsiacich a frézovacích operáciách.

- Plyn

Jedným z účinných spôsobov chladenia je chladenie stlačeným CO₂ (plyn sa do miesta rezu privádza pod tlakom 0,5 až 7 MPa). Táto metóda chladenia sa používa hlavne pre obrábanie ťažkoobrobiteľných materiálov, no náklady na CO₂ ako aj určité nebezpečie pri používaní spôsobili nie veľmi frekventované použitie[1].

Veľmi účinným chladením s použitím plynnej látky je takzvané kryogenické chladenie. Jedná sa o veľmi efektívny odvod tepla z miesta rezu, čo zaručuje aj zvýšenú trvanlivosť nástroja, nižšiu drsnosť povrchu, respektíve vyššiu akosť obrobenej plochy.

Význam a účinnosť kryogenického chladenia či už CO₂ alebo LN₂ je možné pozorovať v porovnaní s konvenčnými metódami chladenia pri obrábaní:

- ⇒ Suché obrábanie: Dochádza k menšiemu opotrebeniu nástroja než pri použití CO₂, no vznikajú veľmi vysoké teploty (600 °C) a proces rezania je nedostatočne chladený.
- ⇒ Obrábanie s kryogenickým chladením oxidu uhličitého CO₂: Najväčšie opotrebenie nástroja, predovšetkým pri vyšších rezných rýchlostiach a posuve nástroja.
- ⇒ Obrábanie s kryogenickým chladením tekutého dusíku LN₂: Dosahuje najlepších výsledkov vzhľadom na opotrebenie nástroja.

⇒ Obrábanie s chladením CO₂ + MQL (Minimum quantity lubrication): Veľké opotrebenie nástroja, podobne ako pri chladení s CO₂.

Chladienie použitím CO₂ zvyšuje životnosť nástroja, no len pri nižších, respektíve stredných rezných rýchlostiach a posuve. Tento spôsob chladienia redukuje tepelné namáhanie nástroja a tým pádom sa znižuje tendencia vzniku trhlín, a taktiež sa eliminuje odlupovanie povlaku.

Pri vyšších rezných rýchlostiach a posuve sa redukuje alebo absolútne eliminuje rozdiel medzi kryogenickým chladiením a chladiením konvenčnými emulziami.

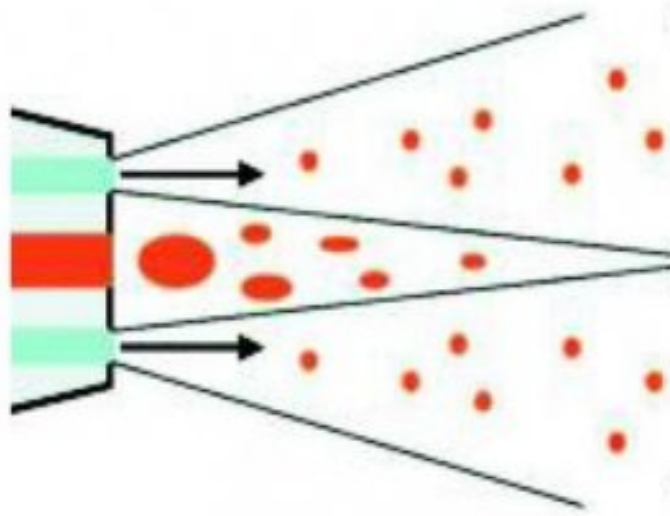


Obr.1.3.3 Kryogenické chladienie [4]

- Rezná hmla

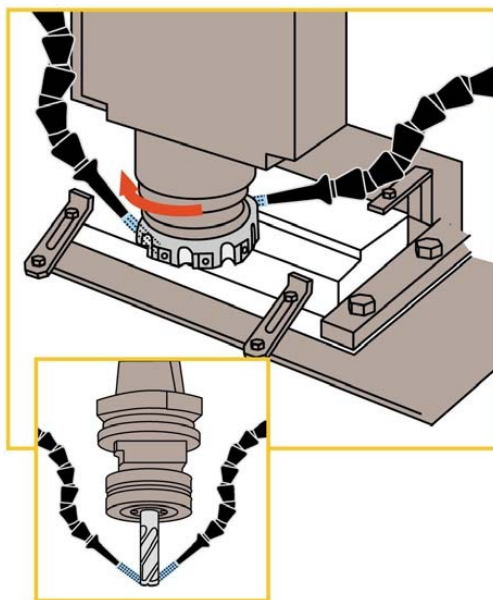
Technológia MQL predstavuje ďalšiu zaujímavú možnosť mazania minimálnym množstvom maziva. Výhody tejto technológie chladienia spočívajú predovšetkým v tom, že sa jedná o ekonomicky výhodnú voľbu a veľkú šetrnosť k životnému prostrediu. Spočíva to predovšetkým v obmedzení objemu procesnej kvapaliny dodávanej do miesta rezu. Malé množstvo lubrikantu je do miesta rezu dodávané prostredníctvom prúdu vzduchu. V tomto prúde vzduchu je lubrikant rozptýlený, a tým je vytvorený jemný aerosol. Najviac sa používajú minerálne a rastlinné oleje, a to hlavne kvôli dobrému

mazaciemu účinku. Mazací účinok tiež zabezpečuje zníženie reznej teploty. Ďalšou výhodou je, že nie je potrebná žiadna zberná a odpadová nádrž, a teda sa minimalizujú náklady potrebné o starostlivosť a likvidáciu procesných kvapalín, čistenie triesok a obrobku.



Obr. 1.3.4 Tvorba aerosolu [4]

Pri chladení reznou hmlou je rezná kvapalina rozptýlená tlakom vzduchu pri rýchlosti až 300 m s^{-1} , a nasmerovaná priamo na reznú časť nástroja. Odvod tepla z miesta rezu sa dosiahne tým, že rozpínajúci sa vzduch obsahuje čiastočky reznej kvapaliny a tie sú schopné intenzívne preberať vzniknuté teplo [1].



Obr. 1.3.5 Chladenie reznou hmlou- frézovanie [1]

V ďalších kapitolách sa už budem venovať chladeniu procesnými kvapalinami, nakoľko zameranie mojej práce sa týka vysokotlakového chladenia procesnými kvapalinami.

1.2. Procesné kvapaliny

1.2.1. Typy procesných kvapalín

Kvapaliny sa obecné rozdeľujú na tie, ktoré majú prevažujúci chladiaci účinok, a tie, ktoré majú prevažujúci mazací účinok. V súčasnosti sa najčastejšie stretávame s kvapalinami s prevažujúcim mazacím účinkom, avšak je zvýšený aj chladiaci účinok.

Ďalej sa kvapaliny vo všeobecnosti rozdeľujú na emulzie, vodné roztoky a oleje [1].

- Emulzie

Ide o najrozšírenejšie kvapalné prostredie. Je to sústava dvoch nerozpustných kvapalín. Najdôležitejšia je voda, a v nej je rozpustená druhá kvapalina vo forme rozptýlených mikroskopických kvapôčok. Hlavnou úlohou emulzných kvapalín je chladiaci efekt a čiastočne aj mazací, ale to len pri vyšších koncentráciách [1].

- Vodné roztoky

Hlavnou zložkou je voda. Tá sa vyznačuje hlavne dobrými chladiacimi vlastnosťami. Avšak, voda podporuje koróziu a taktiež vznik prostredia, v ktorom sa darí baktériám, čo môže spôsobovať vznik nepríjemného zápachu. Aby sa tomuto predišlo, do vody sa pridávajú niektoré ďalšie látky, ako napríklad uhličitan sodný alebo dusičnan sodný [1]. Takto upravené vodné roztoky sa svojimi vlastnosťami podobajú na emulzie.

- Oleje

Oleje sa ďalej rozdeľujú do niekoľkých podskupín.

Prvou z nich sú minerálne oleje. Ide o kvapalné uhľovodíky. Vynikajú dobrým mazacím a ochranným účinkom. V porovnaní s emulziami a vodnými roztokmi majú však horší chladiaci účinok.

Mastné oleje tvoria estery mastných kyselín a čiastočne aj voľné mastné kyseliny. Sú to látky rastlinného a živočíšneho pôvodu. Majú lepšie mazacie vlastnosti než minerálne oleje.

Rezné oleje sú zušľachtené minerálne oleje s prísadou mastných látok. Vlastnosti sú teda ovplyvnené pomerom jednotlivých zložiek.

Ďalej sem ešte patria rezné oleje s prísadami, syntetické a polysyntetické kvapaliny, ktoré predstavujú predovšetkým dobré chladiace, respektíve mazacie účinky [6].



Obr. 1.2.1 Chladienie rezného procesu esterovým olejom [6]

1.2.2. Účinky procesných kvapalín

Účinky procesných kvapalín je možné z prevádzkového a technologického hľadiska rozdeliť týmto spôsobom:

- Chladiaci účinok
- Mazací účinok
- Čistiaci účinok
- Rezací účinok
- Ochranný účinok

Chladiaci účinok

Je to schopnosť rezného média (kvapaliny) odvádzať teplo z miesta rezania. Odvod tepla vznikajúceho pri rezaní sa uskutočňuje tak, že kvapalina obklopuje nástroj, triesky a obrobok, a preberá časť vzniknutého tepla. Dôsledkom chladiaceho účinku je zníženie teploty rezania, čo má priaznivý vplyv na opotrebenie a trvanlivosť nástroja, no taktiež na akosť povrchovej vrstvy obrobenej plochy. Veľkosť účinku chladenia rezného procesu závisí na zmáčanej schopnosti, na výparnom teple, rýchlosti vyparovania za určitých teplôt, tepelnej vodivosti či na mernom teple a prietokovom množstve [1]. Dá sa povedať, že s nárastom reznej rýchlosti pri obrábaní je potrebné výrazne zvýšiť chladiaci účinok rezného prostredia. Preto napríklad pri operáciách ako brúsenie, prevláda požiadavok chladiaceho efektu.

Mazací účinok

Mazací účinok je umožnený predovšetkým tým, že kvapalina vytvára na povrchu obrobku a nástroja vrstvu, ktorá bráni priamemu styku kovových povrchov. Ďalej znižuje trenie, treciu prácu a teplo vzniknuté trením, ku ktorému dochádza medzi nástrojom a obrobkom. Základným predpokladom pre uplatnenie je možnosť vniknúť na tieto plochy. Úlohou mazacieho účinku je zmenšenie rezných síl, zmenšenie spotreby energie, a tiež zlepšenie akosti obrobenej vrstvy. Mazací účinok sa vyžaduje predovšetkým pre dokončovacie a náročné operácie, ako napríklad preťahovanie, rezanie závitov, vystružovanie otvorov či výroba ozubenia [1]. Mazací účinok je dôležitý tiež z hľadiska tvorby nárastkov. Pri vytvorení dostatočnej vrstvy mazacieho filmu na stykových plochách dôjde k zabráneniu tvorby nárastkov v dôsledku zabránenia adhézie.

Čistiaci účinok

Jedná sa o očistenie po obrábaní materiálu od triesok a častíc z miesta rezu. Aplikuje sa vo forme prúdu plynu alebo kvapaliny. Odstraňovanie týchto častíc z miesta rezu uľahčuje vznik nových triesok, a chráni obrobený povrch a brit pred poškodením. Čistiaci účinok je dôležitý hlavne pri brúsení, rezaní závitov alebo vŕtaní hlbokých dier.

Rezací účinok

Spočíva v uľahčovaní plastickej deformácie pri tvorbe triesky. Orientované častice povrchovo aktívnych látok sa snažia preniknúť do povrchových trhlín, a v dôsledku vzájomného pôsobenia vytvárajú tlak na steny trhlín [2].

Ochranný účinok

Schopnosť nenapádať kovy a nespôsobovať koróziu je veľmi podstatná z dôvodu, aby nebolo nutné výrobky medzi jednotlivými operáciami konzervovať, a ďalej aby bol stroj chránený pre prípadnou koróziou. Nemusi sa jednať len o vodiacu časť stroja, ale aj napríklad prídavky a meradlá. Túto schopnosť nazývame aj ochranným účinkom. Pre zabezpečenie antikoročných účinkov sú do rezného média pridávané pasívne prísady. Dôležitým požiadavkom je aj to, aby procesná kvapalina nerozpúšťala nátery obrábacích strojov a nebola agresívna voči gumovým tesneniam [1].

1.2.3. Vlastnosti procesných kvapalín

Medzi vlastnosti procesných kvapalín patrí predovšetkým:

- Prevádzková stálosť
- Zdravotná nezávadnosť
- Prevádzkové náklady

Prevádzková stálosť

Prevádzková stálosť sa udáva ako doba do výmeny rezného prostredia. Dlhšia doba medzi jednotlivými výmenami je podmienená tým, že vlastnosti sa celú túto dobu nemenili [1]. Prevádzková stálosť rezného média závisí na jeho fyzikálnych a chemických vlastnostiach, a taktiež na pracovných teplotách.

Zdravotná nezávadnosť

V dnešnej dobe sa veľký význam kladie na zdravotnú nezávadnosť. Obsluha obrábacieho stroja pri práci prichádza do styku s procesnou kvapalinou. Z tohto dôvodu nesmie byť médium zdraviu škodlivé, nesmie byť jedovaté a obsahovať látky dráždiace sliznicu a pokožku [1].

Prevádzkové náklady

Pri použití procesných kvapalín je potrebné zvážiť aj primerané prevádzkové náklady. Tie úzko súvisia so spotrebou rezného média. Najskôr je nutné posúdiť ich vplyv na proces obrábania, predovšetkým trvanlivosť a opotrebovanie nástroja, akosť povrchu obrobku a spotrebu energie. Taktiež je potrebné zvážiť prevádzkovú stálosť, spotrebu či náklady na likvidáciu.

1.2.4. Voľba procesnej kvapaliny

Voľba reznej kvapaliny je veľmi podstatná, no vôbec nie ľahká záležitosť. Do úvahy je nutné brať široké spektrum požiadaviek. Tieto požiadavky je nutné špecifikovať pre konkrétne obrábacie operácie. Voľba rezného prostredia je najviac ovplyvnená:

- Reznými podmienkami
- Typom obrábacej operácie
- Vlastnosťami obrobku

Typ obrábacej operácie

Pri hrubovacích operáciách je úlohou chladiacej kvapaliny predovšetkým zvýšiť trvanlivosť nástroja, a tiež zmenšiť príkon stroja znížením rezných síl. Rezné oleje významne znižujú príkon stroja, no na trvanlivosť nástroja majú malý vplyv.

Funkcia procesnej kvapaliny je oveľa významnejšia pri dokončovacích operáciách. Pri týchto operáciách nie je dodržanie trvanlivosti tak dôležité, ale ide predovšetkým o dodržanie vysokej akosti obrábanej plochy [3].

- Sústruženie

Pri tejto operácii je dôležité dodržať trvanlivosť nástroja. Najvhodnejšie je preto použiť emulzné kvapaliny. Taktiež je výhodné použiť vysokotlakové chladenie. Ak je pri operáciách sústruženia zvýšený požiadavok na akosť obrobeného povrchu, doporučuje sa voliť emulzie s vyššou koncentráciou či rezné oleje [3].

- Frézovanie

Najväčší dôraz sa kladie na predĺženie trvanlivosti britov fréz, a taktiež na zmenšenie trenia. Z tohto dôvodu sa používajú výhradne emulzie. Pri frézovaní je dôležitá voľba dostatočného objemu a účinku chladenia tak, aby boli minimalizované tepelné šoky na brit [3].



Obr 1.3- Frézovanie s použitím chladenia reznou kvapalinou [8]

- Vrtanie

Pri vrtaní sa obecné používa ako rezná kvapalina rezný olej a emulzná kvapalina so zvýšenou koncentráciou. Úlohou rezného prostredia je jednak predĺženie trvanlivosti britu, a taktiež vyplavovanie triesok po vrtaní hlbokých dier [3].

- Rezanie závitov

Jedná sa o náročnú operáciu, kedy je dôležité dodržanie profilu závitov a samozrejme aj akosť povrchu. U bežných materiálov sa používajú emulzie s prísadou aktívnych látok alebo rezné oleje. Pri ťažkoobrobiteľných materiáloch sa doporučuje používať oleje s prísadami a rastlinné oleje [3].

- Brúsenie

Pri brúsení vzniká vysoké teplo, ktoré z veľkej časti prechádza z miesta rezu do obrobku. Z tohto dôvodu musí mať rezná kvapalina dobrý chladiaci účinok. Používajú sa

emulzie s koncentráciou do 5% [3]. Pre brúsenie špeciálnych tvarov, ako su napríklad ozubené kolesá či závitý, sa ako rezná kvapalina používa rezný olej.

- Honovanie

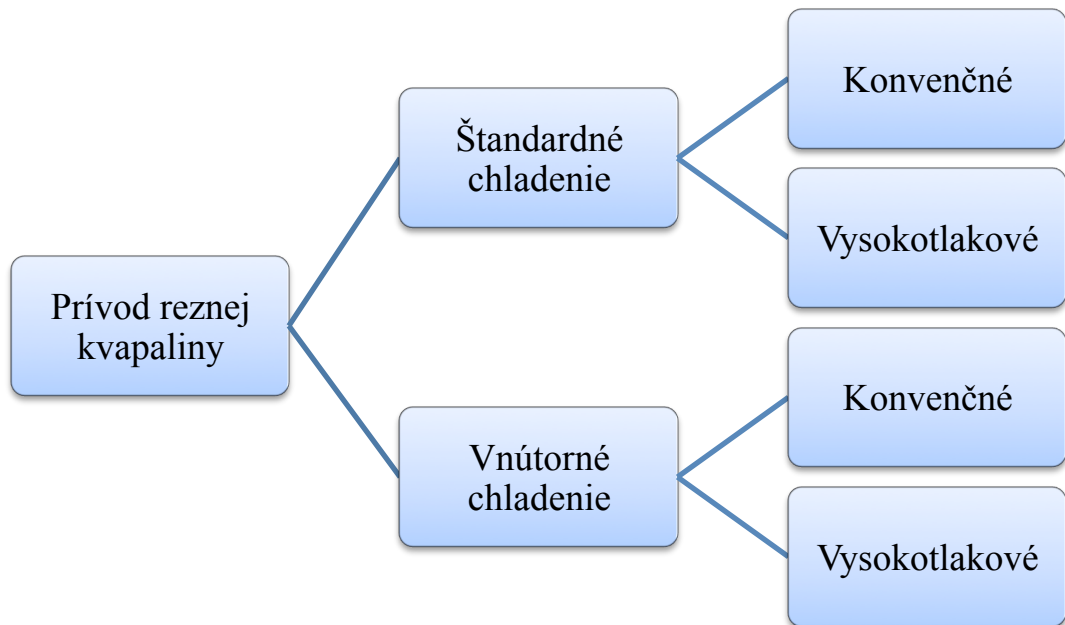
Pre honovanie a superfinišovanie sa odporúča zmes oleja alebo aj emulzia s koncentráciou do 10% [3]. Jej hlavnou úlohou je odvádzať teplo, ktoré vzniká pri pohybe honovacej hlavy, a tiež vyplachovať čiastočky obrobeného materiálu z brúsiaceho kameňa.

Obrábaný materiál

Voľba procesnej kvapaliny z hľadiska materiálu sa riadi nasledujúcim pravidlom. Zvyšovaním pevnosti obrábaného materiálu dochádza k väčšiemu namáhaniu britu nástroja, a preto je nutné voliť kvapalinu s vyššou koncentráciou alebo prísady, ktoré zaručujú vyššiu pevnosť mazacej vrstvy. Pre materiály s horšou tepelnou vodivosťou je treba vyberať procesnú kvapalinu, ktorá zaručuje pevnosť mazacej vrstvy aj za vyšších teplôt.

1.2.5. Prívod procesnej kvapaliny

Spôsob prívodu reznej kvapaliny do miesta rezania významne ovplyvňuje parametre rezného procesu, predovšetkým trvanlivosť britu nástroja a akosť obrobenej plochy.

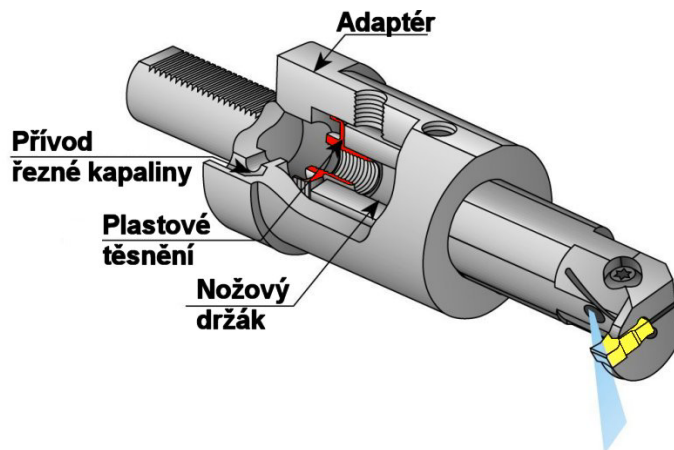


Štandardné chladenie

Štandardné chladenie prívodu reznej kvapaliny nevyžaduje žiadnu úpravu prírodného potrubia. Vystačí si so štandardným zariadením, ktoré je štandardne dodávané výrobcom obrábacieho stroja. Chladiaci systém je tvorený nádržou na reznú kvapalinu, čerpadlom a rozvodovým potrubím [1].

Vnútorne chladenie

Vďaka vnútornému chladeniu je možné výrazne zvyšovať výkon obrábania a rezné rýchlosti, a to až o 5 až 15 %. Táto metóda je vhodná pri sústružení pre nástroje s vymeniteľnými britovými doštičkami zo spekaných karbidov. Vrtáky majú reznú kvapalinu privádzanú centrálnymi otvormi v telese nástroja až do miesta rezu. Vnútorne chladenie sa používa aj u klasických šroubových vrtákoch. Tento spôsob chladenia sa využíva pri vŕtaní hlbokých dier a ťažkoobrobiteľných materiálov. Procesnú kvapalinu možno privádzať do miesta rezu aj v prípade frézovania, čo prináša takisto radu výhod [1].



Obr. 1.4.5 Nůž s vnitřním chlazením [1]

Tlakové chlazenie

Pri tlakovom chladení je procesná kvapalina privádzaná do miesta rezu pod vysokým tlakom. Rezná kvapalina je privádzaná na brit nástroja, priamo do miesta rezu. Tento typ chladenia je výhodné použiť tam, kde vzniká príliš veľké teplo, ktoré má nepriaznivý vplyv na trvanlivosť nástroja. Nedostatkom tohto spôsobu chladenia je to, že sa rezná kvapalina rozstrekuje a tvorí hmlu, a preto je potrebné pracovný priestor uzavrieť, aby sa pracovné prostredie neznečist'ovalo [1].

Procesnú kvapalinu možno dodávať pod vysokým tlakom či už štandardným alebo vnitorným chladením. Princíp a podstata vysokotlakového chladenia je detailnejšie popísaná v ďalšom pokračovaní práce.

Podchladzovanie reznej kvapaliny

K zvýšeniu trvanlivosti britu v určitej miere prispieva aj podchladenie reznej kvapaliny na teplotu nižšiu ako je teplota okolia. Bežné druhy rezných kvapalín môžu byť podchladené o 5 až 7 stupňov Celzia pri zachovaní mazacích vlastností, oleje až o 15 až 20 stupňov Celzia[1]. Teplotu kvapaliny možno znížiť aj pod bod mrazu, čo môže priniesť ďalšie zvýšenie výkonu obrábania, no je nutné použiť kvapalinu špeciálneho zloženia.

2. Vysokotlakové chladenie

V súčasnom trende prechodu na bezobslužnú výrobu sa výrobcovi strojov a nástrojov čoraz viac snažia využívať také technológie, ktoré im zaistia bezproblémový priebeh pri obrábaní. Pre tento účel výrobcovia vyvíjajú riešenia, ktoré využívajú vysoký tlak reznej kvapaliny. Takéto riešenie prináša množstvo výhod, či už vyššiu kvalitu obrobenej súčasti, alebo výrazné predĺženie životnosti nástroja.

Hlavnou úlohou vysokotlakového chladiaceho systému je odvod tepla z nástroja a obrábanej súčasti pomocou reznej kvapaliny pod vysokým tlakom. Toto riešenie vytvára predpoklady pre zvýšenie rezných rýchlostí. Taktiež vďaka lepšej kontrole utvárania triesok sa znižujú prestroje a zvyšuje sa využitie stroja.

2.1. Princíp

Systém vysokotlakového prívodu reznej kvapaliny je založený na účinkoch paralelných laminárnych prúdoch reznej kvapaliny privádzaných tryskami pod vysokým tlakom, a pod správnym uhlom na správne miesto britu. V nástroji sú zabudované trysky, predom nasmerované a vysoko presné. Nástrojový držiak je opatrený dvoma alebo tromi tryskami podľa typu nástroja. Čerpadlo obrábacieho stroja zaisťuje prívod reznej kvapaliny do nástroja. Chladiace systémy pracujú štandardne pod tlakom okolo 80 barov, no v budúcnosti sa uvažuje o ďalšom náraste tlaku [5].



Obr. 2.1- Vysokotlaková chladenie pri sústružení [8]

2.2. Využitie

Vysokotlakové chladenie je možné použiť pre rôzne obrábacie operácie ako sú sústruženie, frézovanie a vrtanie, predovšetkým na obrábanie problematicky obrobitelných materiálov, ako koroziiivzdornej ocele alebo titánu. Pri dokončovacích sústružníckych operáciách zaisťuje vysokotlakové chladenie lepšie utváranie triesok, a vďaka tomu dochádza k obmedzeniu prestrojov stroja, a teda aj k jeho lepšiemu využitiu. Podobne aj pri frézovaní možno navyšovať rezné parametre, a dosiahnuť tak efektívnejšej výroby. Pri vrtaní je vysoký tlak výhodný z dôvodu lepšieho odvádzania triesok, a plynulý prietok reznej kvapaliny prispieva ku zvýšeniu bezpečnosti vrtania.

2.3. Vysokotlakové chladiace systémy

Na trhu je mnoho vysokotlakových systémov od rôznych spoločností, ktoré fungujú s fixným prietokom reznej kvapaliny. Avšak, tieto systémy nedovoľujú využiť výhody vysokotlakového chladenia naplno. V týchto prípadoch je možné chladiaci agregát buď zapnúť alebo vypnúť. Ten za prevádzky dáva rovnaký objem a tlak bez ohľadu na použitý nástroj a aplikáciu. Z dôvodu, že vysokotlakový systém musí byť nastavený podľa najväčšieho nástroja, ktorý na stroji možno používať, fixný prietok býva spravidla príliš veľký alebo malý, čo môže viesť ku skráteniu životnosti filtrov, ako aj k prehrievaniu a degradácii chladiacej kvapaliny [9].



Obr. 2.3 Prietok je daný veľkosťou nástroja [9]

Firma ChipBlaster ponúka prepracované riešenie v podobe inteligentného systému vysokotlakového chladenia JV40. Tento systém je vybavený automatickou reguláciou prietoku a vďaka tomu dodáva iba také množstvo kvapaliny, ktoré je nutné pre udržanie správneho objemu, ktorý vysokotlakové čerpadlo privádza do miesta rezu. Plnú kontrolu nad tlakom zase umožňuje počítač, pričom tlak je možné zvoliť na riadiacom paneli. Napríklad v prípade, že nástrojom môže pretiecť len 8 litrov kvapaliny za minútu, potom systém bude čerpať a filtrovať iba 8 l/min bez akýchkoľvek strát. Kombinácia programovateľných tlakov a automatická regulácia prietoku prináša radu výhod, ako je zvýšenie životnosti filtrov, čerpadla a ďalších komponentov vysokotlakovkej jednotky [9]. Predĺženie životnosti filtra je vo výrobe dosť zásadné. Cena samotnej filtračnej jednotky

nie je ani zďaleka tak podstatná ako dĺžka vedľajšieho času, ktorý je spôsobený výmenou filtrov, a tým pádom sa aj výrazne znižuje presnosť obrábacieho stroja. Nezanedbateľná je aj vysoká úspora elektrickej energie, pretože jednotka nepracuje stále na plný výkon, ako je tomu pri systémoch so stálym prietokom chladiacej kvapaliny.

Systémy od firmy ChipBlaster vybavené automatickou reguláciou prietoku je možné zakúpiť za cenu porovnateľnú, ako je cena starších typov zariadení od konkurenčných výrobcov. Ďalej treba zdôrazniť aj výrazne nižšie straty vo všetkých uvažovaných smeroch.



Obr. 2.3 ChipBLASTER JV40 [9]

2.4. Výrobcovia nástrojov využívajúci vysokotlakové chladenie

Pri obrábaní, či už sa jedná o sústruženie, frézovanie alebo vrtanie, sa využíva čím ďalej tým viac riešení využívajúcich vysoký tlak reznej kvapaliny. Lepšia kontrola utvárania triesok, predĺženie trvanlivosti nástroja a tým pádom aj vyššia efektívnosť obrábacieho procesu a v neposlednom rade lepšie využitie stroja a vyššia produktivita. To sú dôvody, kvôli ktorým sa výrobcovia nástrojov zaoberajú riešeniami, ktoré využívajú vysokotlakové chladenie. Medzi najznámejších výrobcov nástrojov venujúcim sa tejto problematike patrí:

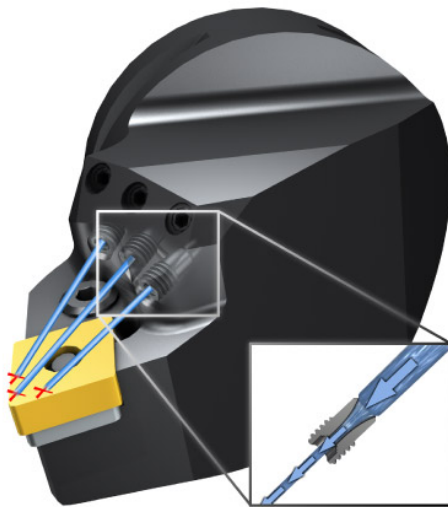
- Sandvik Coromant
- Iscar
- Seco
- Walter tools

Tabuľka zhodnotenie výrobcov nástrojov

Výrobca	Názov technológie	Technológia obrábania	Nástroj (odporúčaný tlak)
Sandvik Coromant	CoroTurn HP	Sústruženie	Coromant Capto, CoroTurn SL, Upínací systém QS, Britové doštičky CoroTurn 107 a T-MAX P s geometriou -MMC, -SMC -PMC...určené pre tlak reznej kvapaliny až 275 barov
Iscar	JET HP line tools	Sústruženie	V závislosti od typu obrábacej stratégie, 70-120 barov
Seco	JETSTREAM TOOLING	Sústruženie/vrtanie	Väčšina nástrojov konštruovaná na maximálny tlak 70 až 80 barov
Walter tools	Walter turn precision cooling	Sústruženie/vrtanie	Lepšie utváranie triesky, predovšetkým pri tlaku nad 40 bar

2.4.1. Sandvik Coromant

Ponuka vysokotlakových chladiacich riešení firmy Sandvik Coromant je pomerne široká, a v porovnaní s ostatnými výrobcami prinášajú ich riešenia dôležitú výhodu, a to, že ich je možné použiť na štandardných strojoch a pre štandardné nástroje. U sústružníckych centier a viacúčelových obrábacích strojoch tvorí sústavu pre prívod reznej kvapaliny napríklad nástroj CoroTurn HP, ktorý v kombinácii s modulárnym upínacím systémom umožňuje prácu s chladením pod vysokým tlakom. Takýto systém využíva vysoko presne, a do nástroja zabudované trysky, ktoré mieria na správne miesto na brite [5]. Výrobca uvádza vo svojom katalógu aj britové doštičky so špecializovanou geometriou pre použitie vysokotlakového prívodu reznej kvapaliny [8]



Obr 2.4 Sandvik Coromant HPC [5]

Spoločnosť Sandvik Coromant ponúka pre svojich zákazníkov software v podobe kalkulátora, ktorý umožňuje vykonávať optimalizáciu alebo návrhy na využitie vysokotlakového prívodu reznej kvapaliny [11]. Do kalkulátora je potrebné zadať parametre ako požadovaný tlak v baroch, počet trysiek ako aj ich priemer, a kalkulátor následne vyhodnotí odporúčaný prietok v litroch za minútu.

HPC Calculator



Type:

Machine Data known | Cutter Data Known

Machine Data

Pressure: bar

Flow rate known | **Number of holes known**

Flow rate: l/min

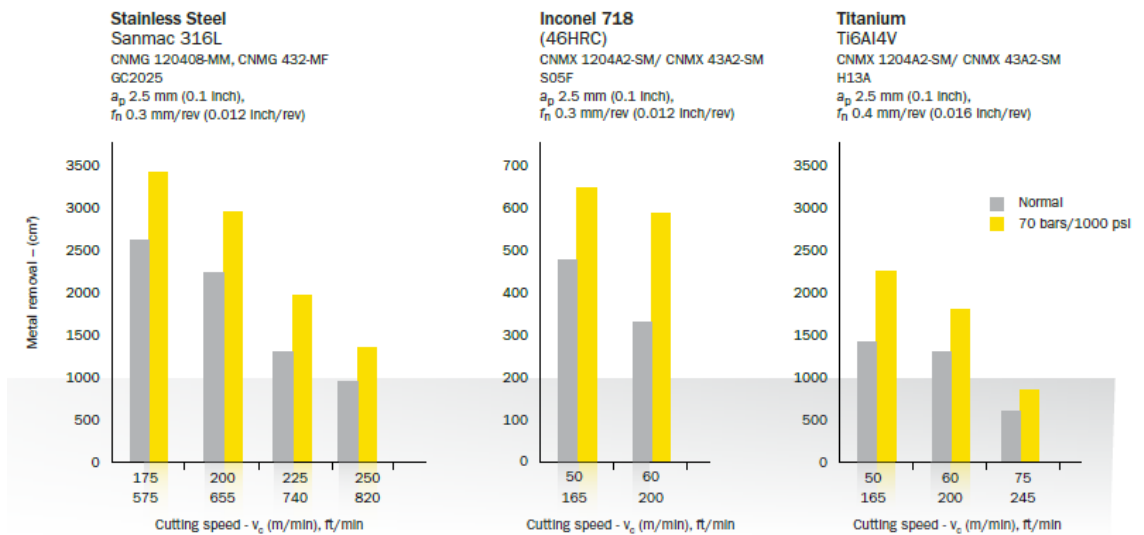
Hole diameter: mm

Maximum number of holes:

Obr. 2.4.1 Kalkulátor prívodu reznej kvapaliny pod vysokým tlakom [11]

Higher removal rate

The tests below show the result of metal removed with CoroTurn HP in different materials.



Obr 2.4.1.1- Porovnanie obrábania troch rôznych materiálov pomocou špeciálnych nástrojov od spoločnosti Sandvik Coromant s použitím normálneho (konvenčného) a vysokotlakového (70 barov) chladenia[8]

2.4.2. Iscar

Podobne ako firma Sandvik, ponúka radu nástrojov pre vysokotlakové chladenie aj firma Iscar. Firma pre túto technológiu vyvíja nový typ nástrojov JET HP line tools.

Podľa slov výrobcu, sú tieto nástroje určené predovšetkým na obrábanie tvrdých a ťažkoobrobiteľných materiálov, ktoré produkujú pri obrábaní veľké množstvo tepla. Medzi najväčšie výhody patrí skrátenie potrebného času na obrábanie až o 200%. Výrobca ďalej garantuje navýšenie trvanlivosti nástroja o 100% [10]. Ďalej je to bezproblémová tvorba triesky a to aj pri problematických materiáloch, ako je napríklad titán. A samozrejme z toho vyplávajúce zvýšenie reznej rýchlosti.

Firma vo svojom katalógu nástrojov pre vysokotlakové chladenie uvádza odporúčané reznú rýchlosť v závislosti od použitého tlaku, druhu obrábacej operácie a použitého materiálu, napríklad titan, oceľ alebo rôzne zliatiny. Napríklad pre titán Ti64 je odporúčaná rezná rýchlosť 30 m/min, no pri použití vysokotlakového chladenia s tlakom na úrovni 150 barov, rezná rýchlosť môže narásť až na hodnotu 55 m/min [10].

V závislosti od veľkosti tlaku reznej kvapaliny firma rozdeľuje chladenie na nízkotlakové (do 30 barov), vysokotlaková (30-120 barov) a ultra vysokotlakové (120-400 barov) [10].

Recommended Speed Correction for High Pressure Coolant vs. External Low Pressure Coolant

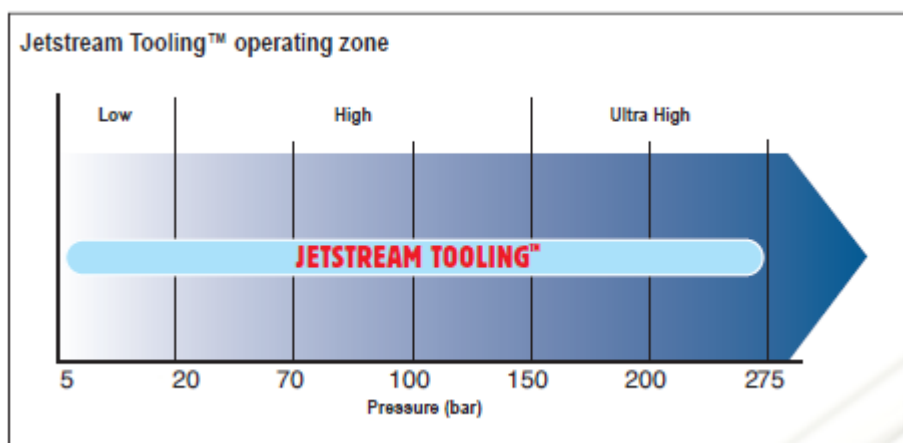
Material	RoughTurning	Finish Turning	Grooving	Contouring with Full Radius Insert
Titanium Ti64				
80 bar	+ 50%	+ 70%	+ 70%	+ 100%
150 bar	+ 75%	+ 120%	+ 100%	+ 130%
300 bar	+ 100%	+ 200%	+ 120%	+ 150%
Inconel 718				
80 bar	+ 40%	+ 60%	+ 50%	+ 50%
150 bar	+ 60%	+ 90%	+ 75%	+ 80%
300 bar	+ 80%	+ 110%	+ 100%	+ 100%
Steel				
80 bar	+ 50%	+ 50%	+ 100%	+ 50%
150 bar	+ 50%	+ 50%	+ 100%	+ 50%
300 bar	+ 50%	+ 50%	+ 100%	+ 50%
Stainless Steel				
80 bar	+ 50%	+ 50%	+ 100%	+ 50%
150 bar	+ 50%	+ 50%	+ 100%	+ 50%
300 bar	+ 50%	+ 50%	+ 100%	+ 50%

Example: If current rough turning cutting speed of Ti64 is 30 m/min, when JHP tool is used with 150 bar coolant, cutting speed can be raised up to about 55 m/min.

Obr. 2.4.2- Odporúčania výrobcu, o koľko je možné navýšiť reznú rýchlosť v závislosti od tlaku dodávanej procesnej kvapaliny, typu obrábaného materiálu a stratégie obrábania [10]

2.4.3. Seco tools

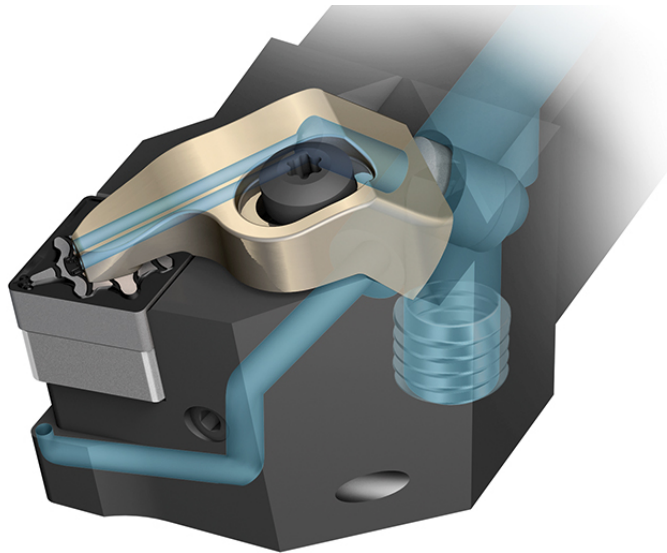
Výrobca nástrojov Seco tools taktiež odpovedal na trend zavádzania vysokotlakového chladenia v obrábaní, svoje riešenie pomenoval Jetstream Tooling. Toto riešenie umožňuje veľké navýšenie reznej rýchlosti a spoľahlivé chladenia ťažkoobrobiteľných zliatin napríklad aj v leteckom priemysle [12]. Podľa slov výrobcu je najväčšou výhodou tohto riešenia zvýšenie produktivity výroby. Jetstream ponúka kompromis medzi trvanlivosťou nástroja a vyššou produktivitou pri obrábaní.



Obr. 2.3.4.- Rozsah použitia tlaku dodávanej procesnej kvapaliny nástrojmi Jetream Tooling a definícia nízkotlakového, vysokotlakového a ultravysokotlakového chladenia podľa spoločnosti Seco tools [12]

2.4.4. Walter tools

Ďalším výrobcom, ktorý sa zaoberá myšlienkou chladenia vysokotlakovým systémom je Walter tools. Walter Turn precision cooling ponúka mnoho výhod. Podobne ako aj u iných výrobcov sa jedná o dlhšiu životnosť nástroja pri obrábaní ocelí a zliatin, a to až o 150%. Toto riešenie ponúka navýšenie reznej rýchlosti až o 100% pri zachovaní rovnakej životnosti nástroja, a zlepšenie tvorby triesky, a to hlavne pri tlakoch nad 40 barov [13]. Výrobca má vo svojej ponuke vymeniteľné britové doštičky so špeciálnou geometriou vhodnou na použitie vysokotlakového chladenia. Čo sa vŕtania týka, firma Walter uvádza vo svojom katalógu radu vŕtacích nástrojov E-treme (monolitné nástroje) s vnútorným chladením vrátane odporúčanej veľkosti tlaku dodávanej procesnej kvapaliny, a to v intervale od 10 do 40 barov v závislosti od stratégie vŕtania [13].



Obr. 2.4.4 Walter Turn precision cooling- precízne chladenie od spoločnosti Walter [13]

2.5. Definícia vysokotlakového chladenia z pohľadu výrobcov nástrojov

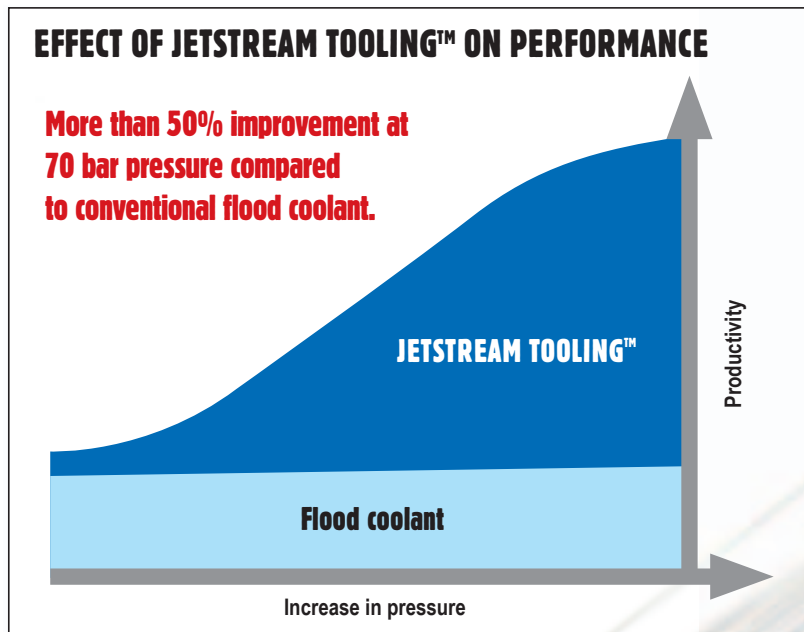
V predošlej kapitole sú spomenutý výrobcovia nástrojov, ktorí sa vo väčšej miere zaoberajú myšlienkou chladenia rezného procesu kvapalinou s vyšším tlakom než sa používa pri konvenčnom chladení. Každý výrobca detailnejšie prepracoval svoju technológiu, ktorú uvádza vo svojich katalógoch. Ako si však možno všimnúť, jednotliví výrobcovia si nadefinovali vysokotlakové chladenie odlišne, a sú viditeľné značné rozdiely v tom, čo výrobcovia už považujú za vysokotlakové chladenie, respektíve kde je hranica medzi konvenčným a vysokotlakovým chladením.

Firma Sandvik Coromant, ktorá ma zo všetkých výrobcov najrozsiahlejšiu ponuku nástrojov určených na obrábanie s vysokotlakovým chladením, definuje túto oblasť okolo hodnoty 70 barov. Tento tlak je teda podľa výrobcu najefektívnejší pri obrábaní ťažkoobrobiteľných materiálov.

U výrobcov Iscar a Seco sú zadané presné hodnoty pre nízkotlakové, vysokotlakové a aj ultra vysokotlakové chladenie. Tu možno pozorovať určité rozdiely, napríklad že Seco považuje vysokotlakové chladenie nad hodnotu 20 barov, zatiaľ čo

Iscar až nad hodnotou 30 barov. Štvrtý spomenutý výrobca Walter tools uvádza ako najefektívnejšiu hodnotu tlaku 40 barov a viac.

Z týchto zistení možno konštatovať, že neexistuje žiadna jednotná definícia, čo možno považovať za vysokotlakové chladenie, a čo ešte za konvenčné chladenie. Každý výrobca si túto problematiku zadefinoval po svojom, a vo svojich katalógoch garantuje už skôr spomenuté výhody použitia vysokotlakového chladenia od nastavenia určitého tlaku procesnej kvapaliny.



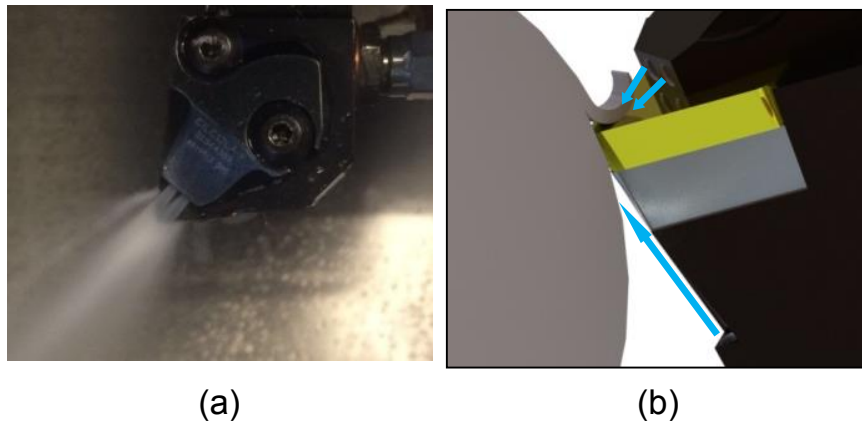
Obr. 2.5 Nárast produktivity pri obrábaní s použitím vysokotlakového chladenia podľa firmy Seco [12]

Na základe zistení od výrobcov teda nie je možné problematiku vysokotlakového chladenia jednotne a jasne definovať. Avšak, všetci výrobcovia sa zhodujú v tom, že navyšovanie tlaku procesnej kvapaliny prináša veľké množstvo výhod ako napríklad nárast produktivity a efektivity výroby, a možnosť obrábať aj ťažkoobrobiteľné materiály pri vyšších rezných rýchlostiach.

Preto som sa v ďalšej kapitole rozhodol detailnejšie venovať vedeckým poznatkom z danej oblasti, zaoberajúcimi sa problematikou vysokotlakového chladenia. Na základe týchto publikácií a experimentov som sa dopracoval k zaujímavým zisteniam, z ktorých vyplýva, že navyšovanie tlaku má výrazný vplyv aj na ďalšie parametre procesu obrábania, ako sú drsnosť obrobenej plochy, reznej sily či tvorba triesky.

3. Vedecké poznatky a zistenia

Problematikou vysokotlakového chladenia sa zaoberalo už nemalé množstvo vedcov a odborníkov z danej oblasti. Prebehlo niekoľko experimentov, kde sa posudzovali ako pozitívne, tak aj negatívne účinky a vplyvy chladenia rezného procesu procesnou kvapalinou pod vysokým tlakom. Na základe týchto experimentov vzniklo viacero odborných publikácií, ktoré sa snažia definitívne zhodnotiť prínos a rozvoj v tejto oblasti obrábania.



Obr. 3. Snímok nastavenia experimentu (a) a schéma (b) reprezentujúca použitie vysokotlakového chladenia pri obrábaní [18]

Na obrázku je prezentovaná aplikácia vysokotlakového chladenia pri sústružení, všimnúť si možno prívod procesnej kvapaliny cez vnútro nástroja priamo do miesta rezu.

V nasledujúcich tabuľkách je uvedený prehľad zdrojov s detailami nastavenia technológie:

Tab. 1 Prehľad zdrojov

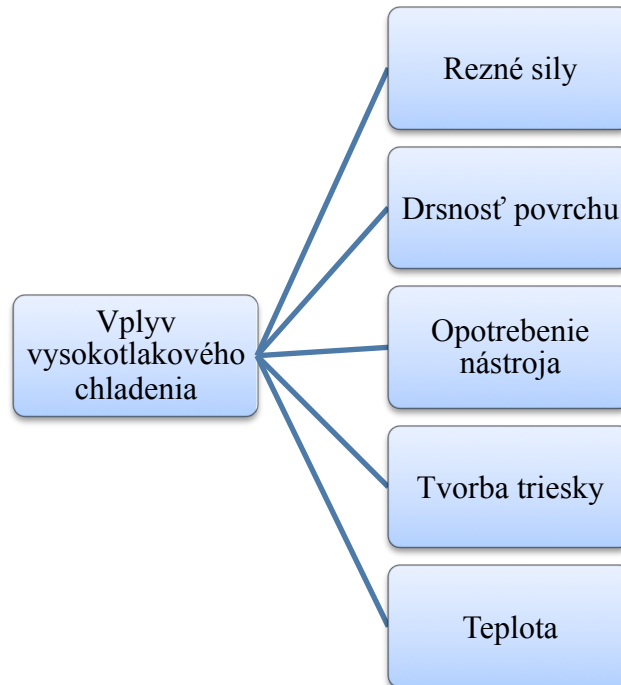
Publikácia	Technológia obrábania	Tlak [bar]	Prietok [l/min]
[14]	frézovanie	70	11 až 14
[15]	frézovanie	17	-
[16]	frézovanie/sústruženie	110/ 50 až 200	10/ 15 až 25
[17]	sústruženie	70; 110; 203	16,9; 18,5; 20,3
[18]	sústruženie	20; 40; 60	6,66
[19]	sústruženie	200	-
[20]	sústruženie	80	-
[21]	sústruženie	70/ 110/ 150/ 203	-
[22]	sústruženie	2000	8

Tab. 2 Prehľad zdrojov

Publikácia	Obrábaný materiál	Procesná kvapalina/ obrábací nástroj/ dôležité zistenia
[14]	Ti-6Al-4V	Fréza s WC-Co povlakovaním; Nárast rezných rýchlostí a posuvu o 20% vďaka použitiu vysokotlakového chladenia
[15]	ASSAB718 steel material	Vplyv vysokotlakového chladenia preukázateľný pri vyšších tvrdostiach (35 HRC)
[16]	Ti-6Al-4V a Inconel 718	Niekoľkonásobne vyššia produktivita obrábanie/ významné predĺženie životnosti nástroja pri tlaku nad 50 barov
[17]	Ti-6Al-4V	6% emulzia; Vymeniteľné britové doštičky z PCD; Najlepšie výsledky dosiahnuté pri tlaku 203 barov
[18]	316L Stainless steel	5% syntetický olej; Vymeniteľné britové doštičky typu CNMA; Zlepšenia obrábacieho procesu pozorované pri vyšších tlakoch (40 až 60 barov)
[19]	Inconel 718	4% emulzia; Keramická vymeniteľná britová doštička SiAlON; Zvýšenie životnosti nástroja a tvorba segmentovanej triesky
[20]	Ti-6Al-4V a Inconel 718	Pri rezných rýchlostiach nad 75 m/min zníženie životnosti nástroja o 60 %
[21]	Ti-6Al-4V	Pri použití vyššieho tlaku procesnej kvapaliny (203 barov) redukcia teploty v mieste rezu až o 38%
[22]	Ocel C45E a Inconel 718	Použitie špeciálne zařívané trysky s priemerom 0,25 až 0,4 mm schopné vyvinúť extrémne vysoký tlak kvapaliny

3.1. Vplyvy vysokotlakového chladenia

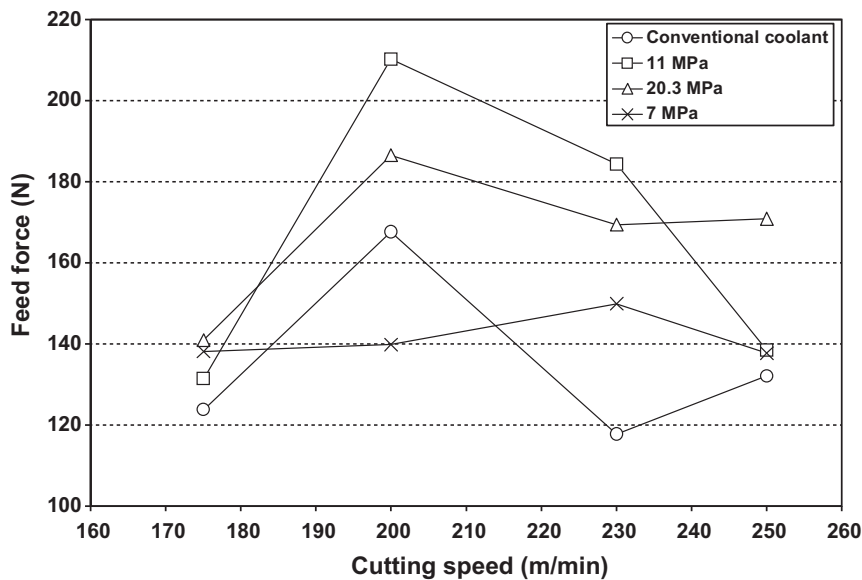
Obrábanie kalenej ocele a ťažkoobrobiteľných materiálov, ako sú zliatiny niklu a titánu, vyžaduje okamžitý prenos tepla z miesta rezu pre zlepšenie životnosti nástroja. Dodávanie chladiacej kvapaliny pod vysokým tlakom je najlepším riešením. Vplyvy vysokotlakového chladenia je možné zhodnotiť z viacerých hľadísk:



3.1.1. Vplyv na rezné sily

Rezné sily rastú s tvrdosťou obrábaného materiálu. Na základe prebehnutého experimentu [15] je zrejmé, že použitie vysokotlakového chladenia je najvýhodnejšie pri tvrdosti obrábaného materiálu okolo hodnôt 35-40 HRC, kedy dochádza k významnému nárastu rezných síl. Dochádza k veľkému opotrebeniu nástroja, a teda vplyv vysokotlakového chladenia je pri tejto tvrdosti najväčší.

V ďalšom experimente [17] sa autori zamerali na monitorovanie posuvnej sily voči reznej rýchlosti pri použití troch rozdielnych tlakov procesnej kvapaliny. Ako je možné vidieť na obrázku, najväčšia posuvná sila bola pri použití tlaku 11 Mpa pri rýchlosti približne 200 až 230 m/min. Ďalej sa zistilo, že nižších síl sme dosiahli pri použití konvenčného chladenia, a to v rozsahu 118 až 168 N [17].

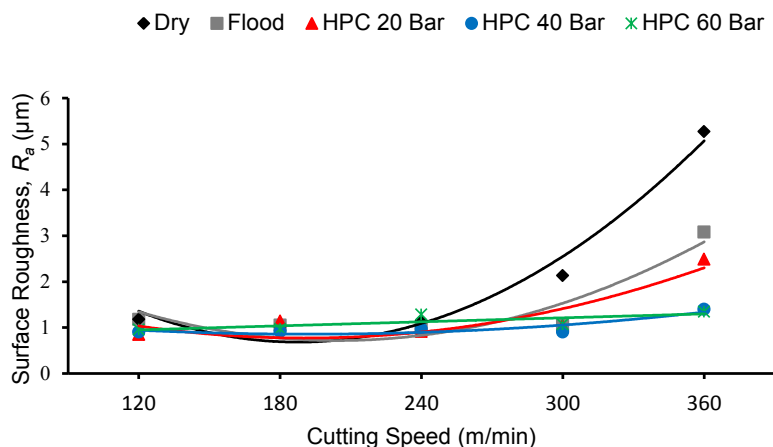


Obr. 2.5.1 Závislosť posuvných síl na rezných rýchlostiach pri použití konvenčného chladenia a rôznych tlakov vysokotlakového chladenia [17]

3.1.2. Vplyv na drsnosť povrchu

Pre všetky tvrdosti obrábaného materiálu poskytuje chladenie rezného procesu lepšie výsledky na drsnosť obrábanej plochy, či už sa jedná o konvenčné alebo vysokotlakové chladenie, avšak pri nižšej tvrdosti nie je veľký rozdiel medzi akosťou obrobenej plochy [15]. Pri vyšších tvrdostiach má vysokotlakové chladenia výraznejší vplyv. Chladiaca kvapalina je schopná znížiť kontaktnú plochu medzi nástrojom a odvodom triesky, čo vedie k zníženiu trecích síl. Znižuje sa trenie medzi nástrojom a obrobkom, a zvyšuje sa kvalita povrchu. Z prebehnutých meraní teda vyplýva, že vysokotlakové chladenie má výraznejší vplyv pri tvrdostiach 35 HRC a viac [15].

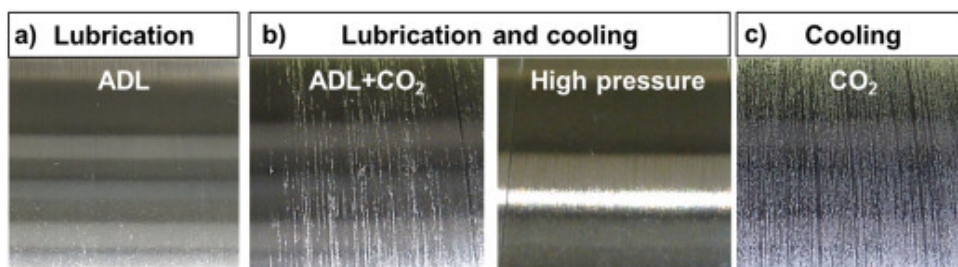
Je podstatné, akou reznou rýchlosťou obrábame. Pri vyšších rezných rýchlostiach dosahujeme lepších výsledkov pri použití vysokotlakového chladenia. Avšak, pri nižších rezných rýchlostiach je výhodnejšie použiť suché obrábanie k dosiahnutiu nižšej drsnosti [18].



Obr. 3.1.2. Závislosť drsnosti obrobenej plochy na rezných rýchlostiach pri použití rôznych druhov chladenia [18]

Žiadny významný rozdiel v drsnosti povrchu nie je pozorovateľný pri rezných rýchlostiach pod 300 m/min. Avšak, nad touto hodnotou reznej rýchlosti drsnosť obrobenej plochy významne rastie, čo nie je prekvapujúce vzhľadom na narastajúce opotrebenie nástroja. Vďaka použitiu vysokého tlaku procesnej kvapaliny je aj pri vysokých rezných rýchlostiach kvalita obrobenej plochy akceptovateľná [18].

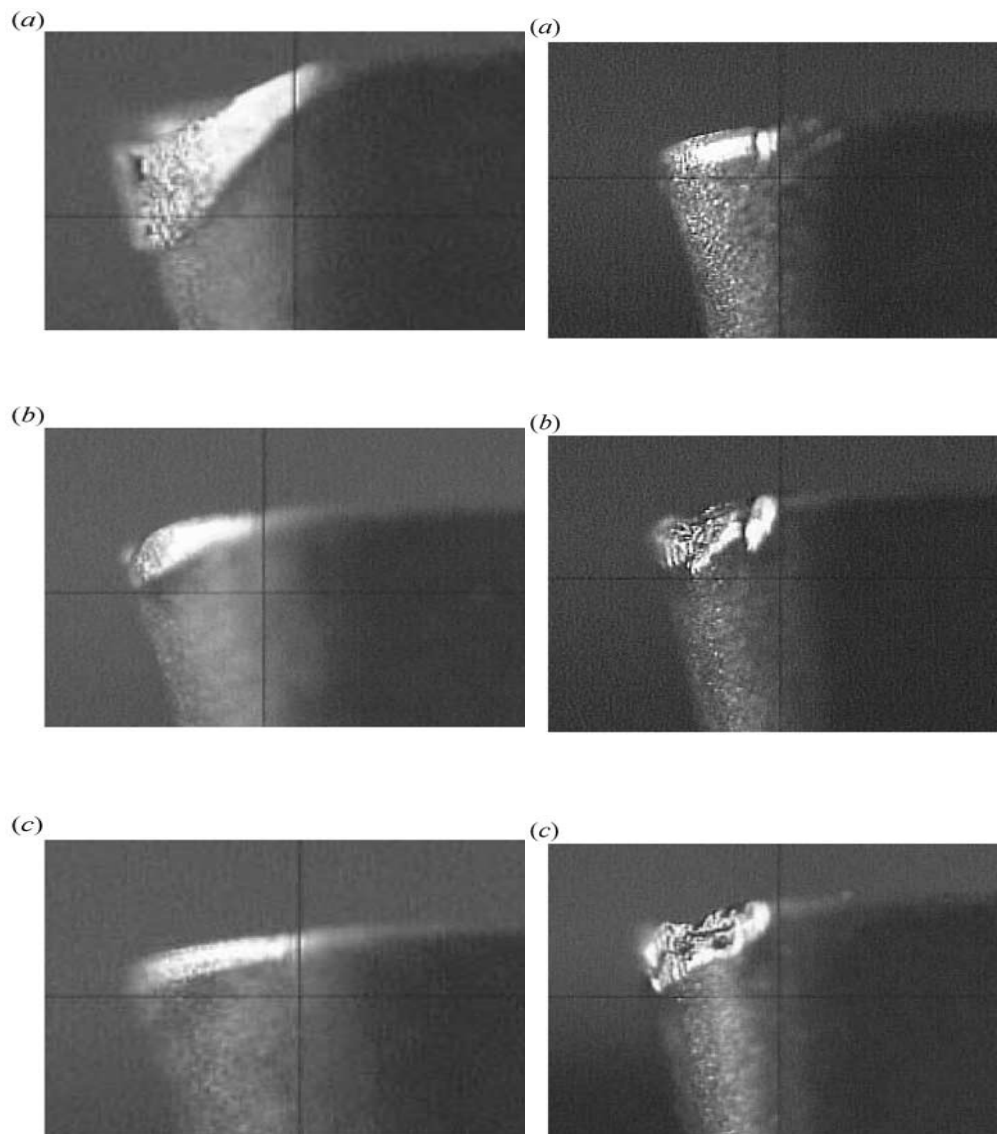
V ďalšom experimente [20] autori porovnali rôzne metódy chladenia, ktoré vyžaduje obrábanie ťažkoobrobiteľného materiálu. Konkrétne sa jedná o vysokotlakové chladenie, kryogenické chladenie a aerosolové suché mazanie (ADL). Každá z týchto metód mala rozdielny účinok na kvalitu obrobenej plochy, no ako možno vidieť na obrázku, najnižšia drsnosť obrobenej plochy vznikla práve po obrábaní za pomoci vysokotlakového chladenia.



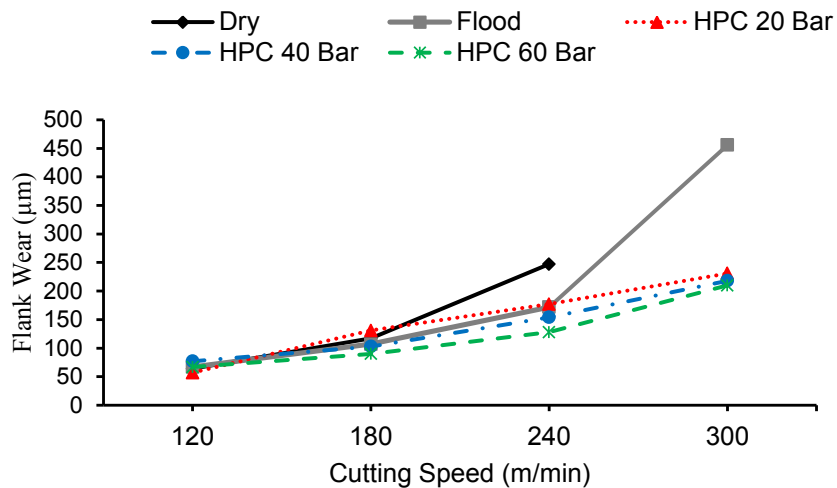
Obr. 3.1.2.2- Kvalita obrobeného povrchu po sústružení s rôznymi stratégiami chladenia [20]

3.1.3. Vplyv na opotrebenie nástroja

Podobne ako pri rezných silách, tak aj pri opotrebení nástroja platí, že vysokotlakové chladenie má výraznejší vplyv až pri vyššej tvrdosti obrábaného materiálu (35 HRC a viac). Naopak pri nižšej tvrdosti (25-30 HRC) má suché obrábanie lepšie výsledky vzhľadom na opotrebenie nástroja [15]. Tieto zistenia platia pre obrábanie ťažkoobrobiteľnej ocele ASSAB 718. Podstatou experimentu boli dokončovacie frézovacie operácie prebehnuté na šiestich rôznych tvrdostiach tejto ocele.



Obr. 3.1.3- Opatrebenie nástroja znázornené pomocou mikroskopu, pre dva rôzne materiály s odlišnými tvrdosťami, vľavo materiál s tvrdosťou 40 HRC a vpravo 25 HRC - (a) suché obrábanie, (b) konvenčné chladenie, (c) vysokotlakové chladenie [15]

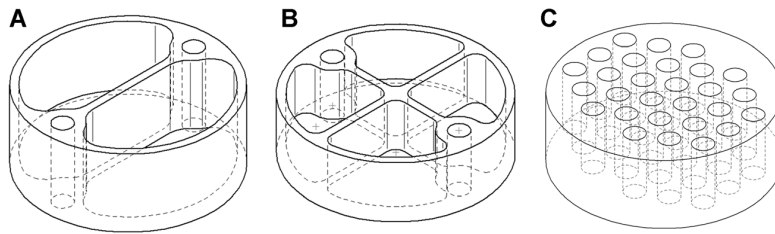


Obr. 3.1.3.1 Závislosť opotrebenia chrbta rezného nástrojania rezných rýchlostiach pri použití viacerých metód chladienia rezného procesu [18]

Ako je možné na grafe pozorovať, pri zvyšovaní rezných rýchlostí opotrebenie chrbta rastie pri všetkých použitých tlakoch procesnej kvapaliny. Pri nižších rýchlostiach (okolo 120 m/min) je opotrebenie nástroja približne rovnaké pre použité všetky tlaky. Podobne ani suché obrábanie, či použitie konvenčného chladienia nepredstavuje žiadny pozorovateľný rozdiel vzhľadom na opotrebenie nástroja. Pri zvyšovaní rezných rýchlostí je však rozdiel už viditeľný, a pri rýchlostiach nad 200 m/min je efekt vysokotlakového chladienia už významný, a teda využitie tejto technológie je určite výhodné. Ďalej však treba spomenúť, že pri rýchlostiach nad 300 m/min, predovšetkým nad 360 m/min rastie opotrebenie nástroja extrémne rýchlo. Opotrebenie nástroja pri tak veľkých rýchlostiach je významné aj pri použití vysokotlakového chladienia [18], a nástroj je za krátku dobu znehodnotený.

V publikácii [14] sa autori zamerali na porovnanie vysokotlakového a konvenčného chladienia pri obrábaní komponentov z titánu. Cieľom experimentu bolo zhodnotenie produktivity, a ďalších benefitov spojených s vysokotlakovým chladením.

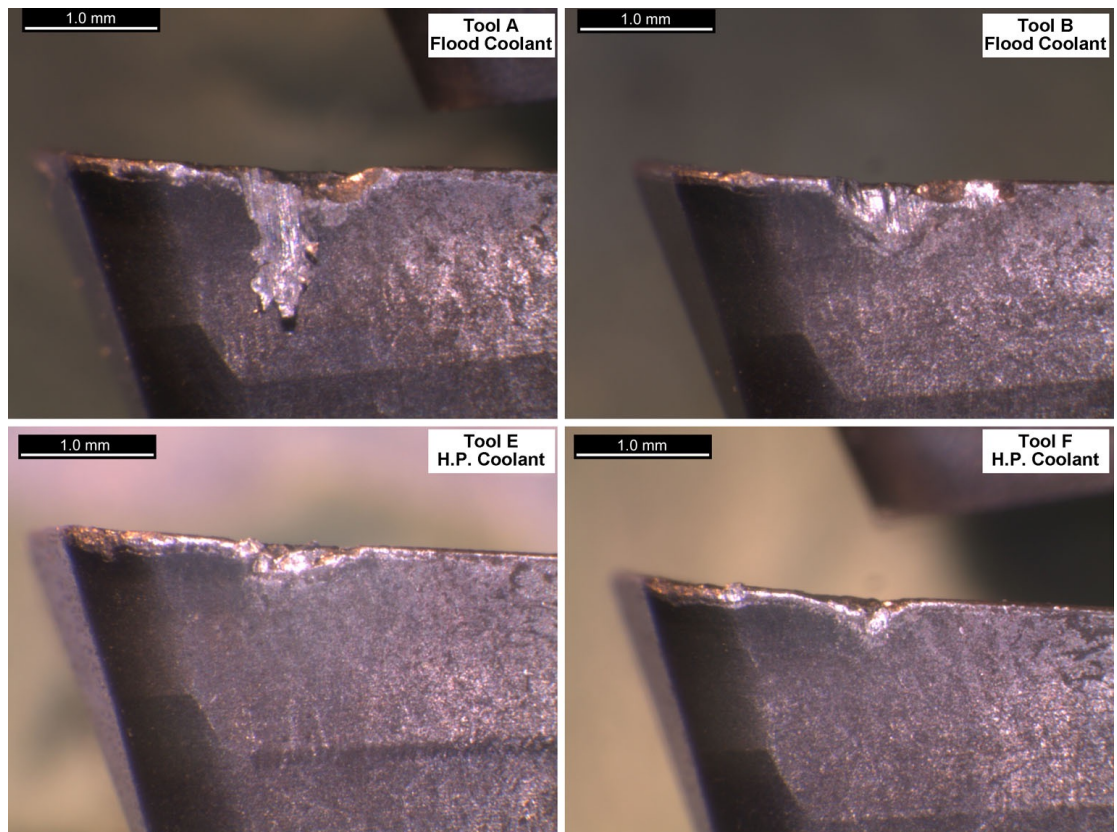
V experimente boli vyrábané komponenty do leteckého priemyslu. Schémy týchto dielov sú uvedené na obrázku nižšie. Jednalo sa o frézovanie do hĺbky až 30 mm a taktiež vrtanie dier do rovnakej hĺbky.



Obr. 3.2.1. Obrábané komponenty [14]

Frézovacie a vŕtacie nástroje boli vybrané od firmy Seco. Ide o nástroje s prívodom procesnej kvapaliny cez vnútro nástroja pomocou kanálikov.

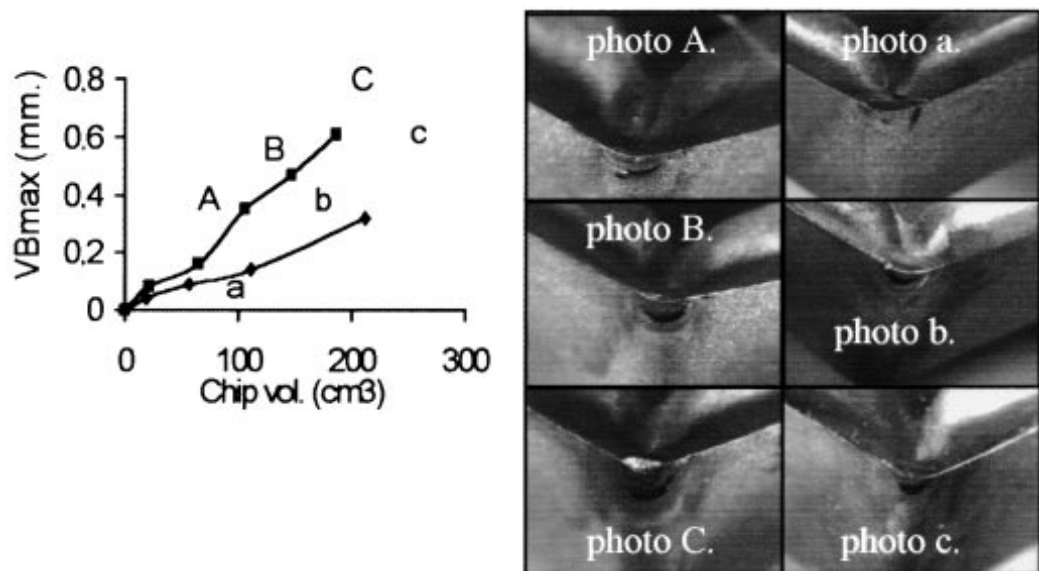
Pri frézovacích operáciách bolo opotrebenie nástroja o poznanie nižšie pri použití vysokotlakového chladenia, čo je dobre pozorovateľné na obrázku nižšie.



Obr. 3.2.2 Opotrebenie nástroja po obrábaní s použitím konvenčného, respektíve vysokotlakového chladenia[14]

Čo sa vŕtania týka, pri použití vysokotlakového chladenia sa čas potrebný na zhotovenie predom určenej diery zredukoval až o 43 %. Je to predovšetkým preto, že pri použití konvenčného chladenia sme nútení voliť vŕtaciú stratégiu “peck drilling”, kedy vrták striedavo vchádza a vychádza z diery za účelom odvodu triesky. Pri vŕtaní s vysokotlakovým prívodom procesnej kvapaliny nie je potrebné voliť túto stratégiu, a teda sa značne skrúti potrebný čas na vŕtanie. Dôvodom je výrazne lepší odvod triesky [14].

V publikácii [16] je opísaný experiment, kde boli ťažkoobrobiteľné materiály podrobené obrábaniu s vyššou produktivitou. Konkrétne sa jedná o zliatiny titánu Ti6Al4V a zliatiny niklu Inconel 718. Takéto materiály su frekventovane využívané predovšetkým v leteckom priemysle. Z dôvodu ich vynikajúcich mechanických vlastností a ich odolnosti voči širokému rozsahu teplôt sa tieto zliatiny používajú vo veľkej miere pri výrobe turbomotorov. Daný materiál bol testovaný vŕtaním a sústružením s použitím vysokotlakového chladenia. Úlohou, respektíve podstatou tohto experimentu bolo stanoviť optimalizované rezné podmienky, ako aj vhodnosť použitia vysokotlakového chladenia vzhľadom na opotrebenie nástroja. Účinnosť vysokotlakového chladenia pri vŕtaní možno vidieť na obrázku, kde je porovnaná s použitím konvenčného chladenia. Ide o závislosť opotrebenia čela nástroja voči objemu odoberanej triesky. Prioritou bolo určenie maximálnej možnej reznej rýchlosti. Bolo možné sa dostať až na hodnoty $v_c = 120$ m/min, no pri tak veľkej rýchlosti rástlo opotrebenie nástroja extrémne rýchlo. Po optimalizácii reznej rýchlosti na hodnoty $v_c = 60$ m/min sa opotrebenie nástroja značne zredukovalo. Pre obrábanie zliatiny titánu bol použitý vrták s TiAlN povlakovaním, a na obrábanie zliatiny niklu to bol vrták s povlakovaním TiN [16].

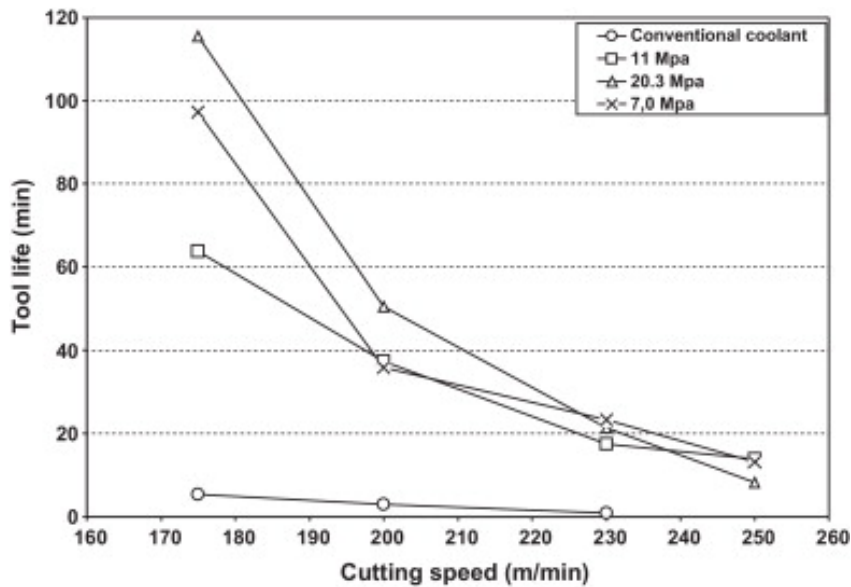


Obr. 3.2.4. Závislosť opotrebenie nástroja na objeme odoberanej triesky -body a, b, c indikujú konvenčné chladenie a body A, B, C indikujú vysokotlakové chladenie [16]

Mnoho publikácií sa zaoberalo práve sústružením, a vplyvom vysokotlakového chladenia na samotný proces sústruženia.

K zaujímavým zistením sa dopracovali autori v publikácii [17]. Hlavným cieľom bolo preskúmať správanie sa nástroju z polykryštalického diamantu (PCD) pri obrábaní ťažkoobrobiteľnej zliatiny titánu pri vysokých rezných rýchlostiach, a použití vysokotlakového chladenia.

Pri sústružení pri použití vysokotlakového chladenia boli dosiahnuté preukázateľné lepšie výsledky oproti konvenčnému chladeniu. Ďalej sa zistilo, že pri rezných rýchlostiach väčších ako $v_c=200$ m/min už vysokotlakové chladenia nemá takmer žiadny efekt, a životnosť nástroja pri tak vysokých rýchlostiach je minimálna. Prívod procesnej kvapaliny prebiehal pri tlakoch 7, 20,3 a 11 MPa. K najlepším výsledkom sme sa dopracovali pri použití najvyššieho tlaku [17].



Obr. 3.3.1 Závislosť životnosti nástroja na rezných rýchlostiach [17]

Najväčšia životnosť nástroja dosiahnutá pri tlaku 203 barov. Vysokotlakové chladenie je najvýhodnejšie použiť pri nižších rýchlostiach do približne 210 m/min.

3.1.4. Vplyv na tvorbu triesky

Triesky vznikajúce pri suchom obrábaní sú dlhé, a majú trúbkovitý tvar. Trieska je pevne stočená, a jej polomer zakrivenia je relatívne menší, než trieska vznikajúca pri použití chladenia procesnou kvapalinou. Je to preto, že pri suchom obrábaní sa triesky podrobia vysokej teplote, čo vedie k väčšej plastickej deformácii triesky.

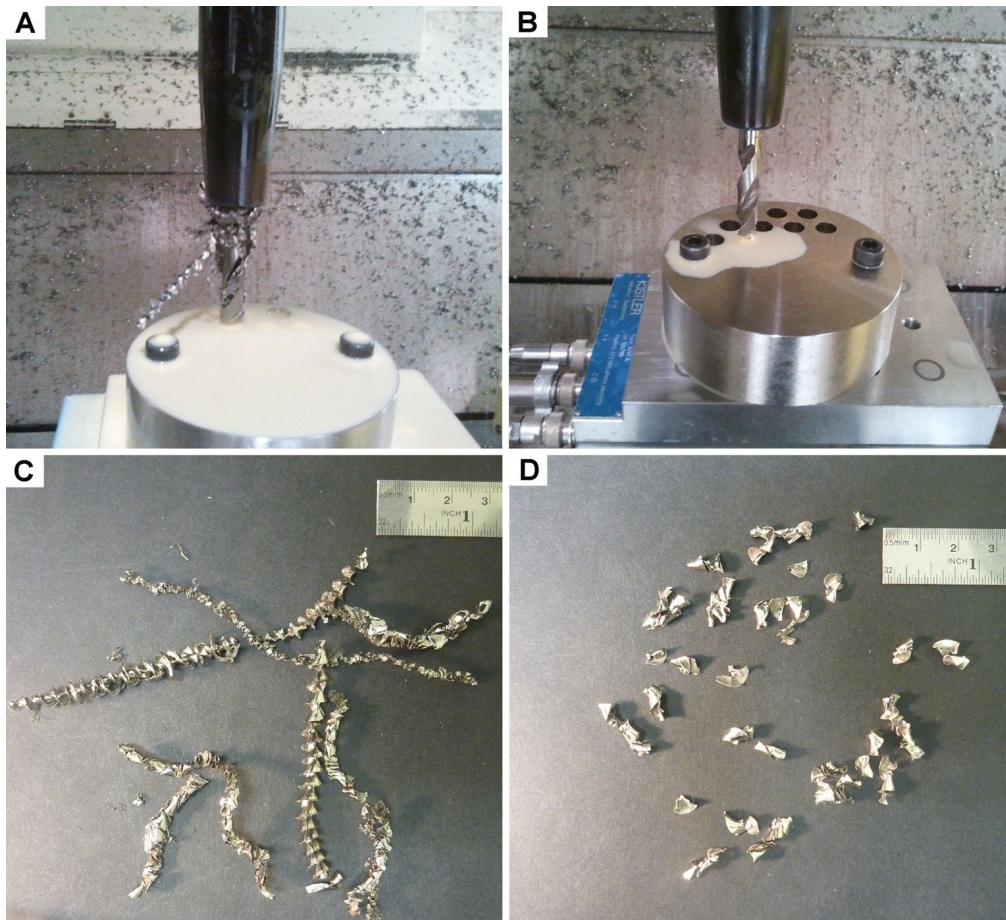


Obr. 3.1.4a Trieska vznikajúca pri suchom obrábaní a pri obrábaní s konvenčným chladením [15]



Obr. 3.1.4b Trieska vzniknutá pri obrábaní s vysokotlakovým chladením [15]

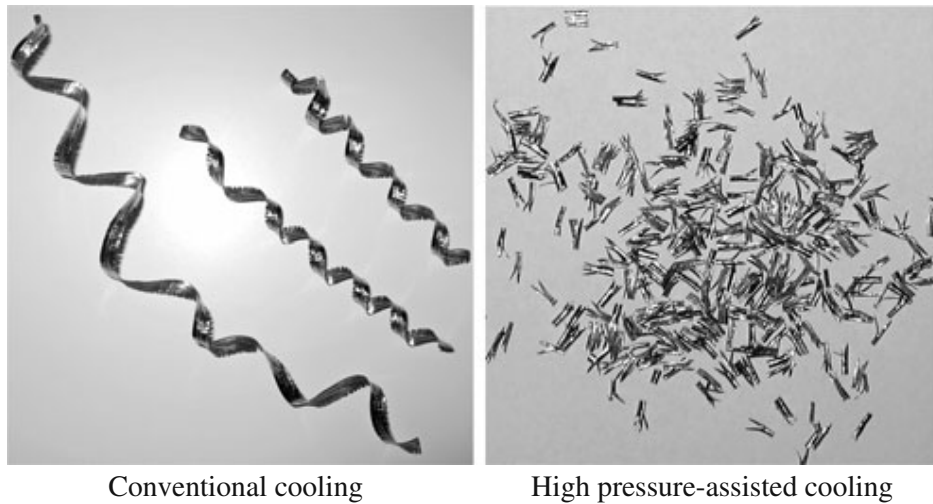
Na obrázkoch je možné pozorovať rozdiel medzi trieskou vznikajúcou pri suchom obrábaní, pri použití konvenčného chladenia reznou kvapalinou alebo použitia vysokotlakového chladenia. Použitie vysokotlakového chladenia reznou kvapalinou je výhodnejšie z dôvodu, že trieska má zúbkovaný okraj väčší a je ďalej od seba. To umožňuje rýchlejšie odvádzať teplo z miesta rezu, a teda menej tepla sa prenáša na nástroj. Tým pádom sa zvyšuje trvanlivosť nástroja, a taktiež sa zlepšuje akosť obrobenej plochy pri optimálnej tvrdosti.



Obr. 3.1.4 Porovnanie vznikajúcej triesky pri konvenčnom (vľavo) a vysokotlakovom(vpravo) chladení pri vŕtaní [14]

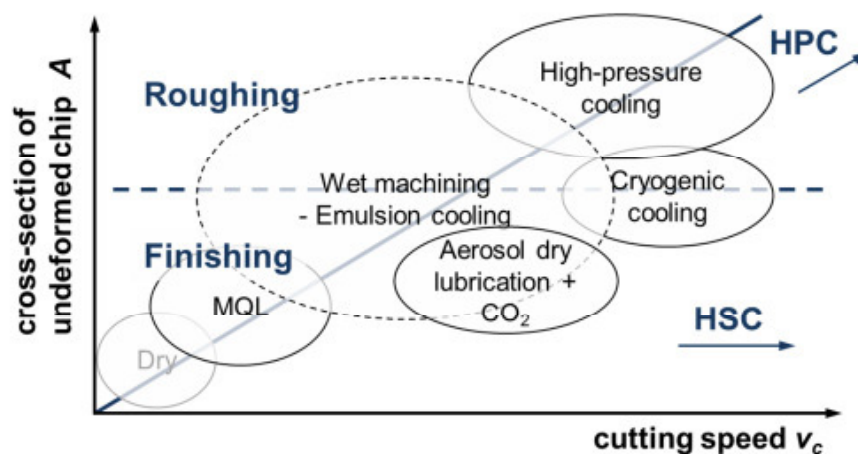
Trieska tvorená pri obrábaní s vysokotlakovým chladením je kratšia a segmentovanejšia.

Vplyvom vysokotlakového chladenia na tvorbu triesky sa zamerali autori experimentu [19]. Obrábaná bola zliatina niklu Inconel 718, a pri sústružení boli použité vymeniteľné britové doštičky SiAlON. Trieska produkovaná pri vysokotlakovom chladení je kratšia, a je rozdelená na kratšie segmenty v porovnaní s trieskou pri konvenčnom chladení, ktorá je oveľa dlhšia a rúrkovitého tvaru [19].



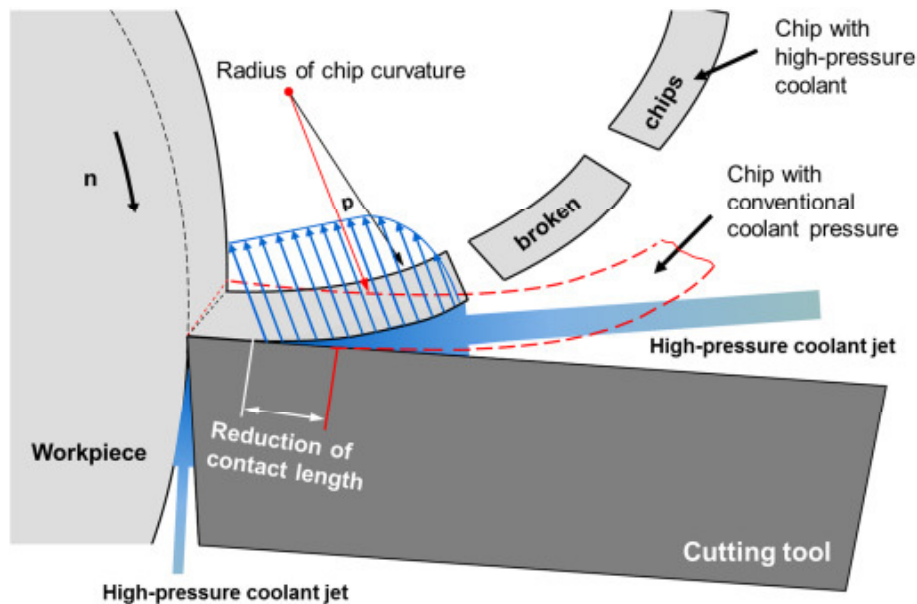
Obr. 3.1.4.2 Trieska produkovaná pri obrábaní, vľavo obrábanie s konvenčným chladením a vpravo s vysokotlakovým chladením [19]

K zaujímavým výsledkom sa dopracovali autori publikácie [20]. Určili rozsah použitia rôznych chladiacich stratégií pri obrábaní ťažkoobrobiteľných materiálov, či sa už jedná o hrubovacie alebo dokončovacie operácie. Použili konvenčné a vysokotlakové chladenie, okrem toho však aj technológiu MQL (minimum quantity lubrication), aerosolové suché mazanie a taktiež kryogenické chladenia.



Obr. 3.1.4.3 Rozsah použitia rôznych chladiacich stratégií pri obrábaní, závislosť prierezu nedeformovanej triesky na rezných rýchlostiach [20]

Na základe grafu možno tvrdiť, že použitie vysokotlakového chladenia je najvýhodnejšie pri hrubovacích operáciách.



Obr. 3.1.4.4 Vplyv vysokotlakového chladenia na tvorbu triesky [20]

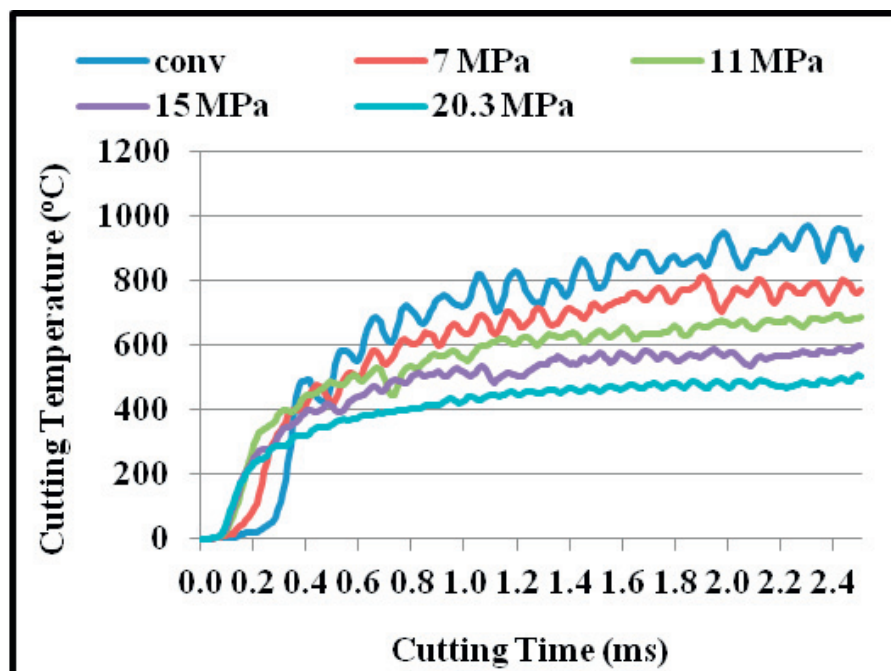
Na obrázku vyššie je schematicky znázornené, ako aplikácia vysokotlakového chladenia ovplyvní tvorbu triesky v porovnaní s konvenčným chladením. Trieska sa láme a je segmentovaná. Ďalej si možno všimnúť, že sa mierne zredukovala kontaktná plocha medzi nástrojom a obrábaným materiálom. To vedie k nižšiemu treniu, zníženiu rezných síl a menšiemu tepelnému zaťaženiu nástroja [20].

3.1.5. Vplyv na teplotu

Pri obrábaní ťažkoobrobiteľných materiálov sa medzi nástrojom a obrobkom generuje veľké množstvo tepla, ktoré nepriaznivo pôsobí na celý proces obrábania.

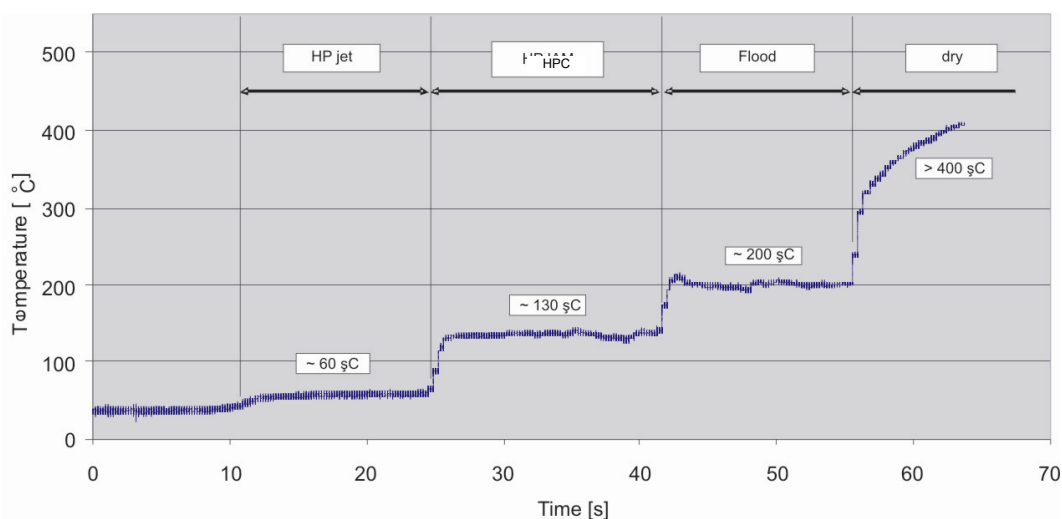
V publikácii [21] je podrobne zaznamenaný proces nárastu teplôt pri obrábaní zliatiny titánu. Rezná rýchlosť sústruženia bola 110 m/min. Teplota bola meraná na špičke nástroja, pričom bol zaznamenaný nárast teploty od počiatočného stavu až po postupnú stabilizáciu. Teplota dosiahla po ustálení približne 880 °C. Takáto teplota však bola dosiahnutá pri konvenčnom chladení. Pri použití vysokotlakového chladenia sa teplota značne znížila, a to na 760 °C pri použití chladenia s tlakom 7 MPa. Pri použití tlaku 20,3 MPa sa teplota znížila až na 470 °C, čo predstavuje už významný pokles teploty [21]. Je teda nespochybniteľné, že vysokotlakové chladenie má významný vplyv

na odvod tepla z miesta rezu. Vysoké teploty zapríčiňujú interakciu obrobku s nástrojom. Materiál obrobku difunduje a môže nastať chemická reakcia s povrchom nástroja.



Obr. 3.1.5 Nárast teploty pri obrábaní- závislosť teploty na čase obrábania [21]

Meraním teploty pri obrábaní s použitím vysokotlakového chladenia sa zaoberali aj v ďalšom experimente [22]. Ako obrábaný materiál bola použitá zliatina niklu a oceľ C45E. Okrem ďalších aspektov bola meraná aj teplota v mieste rezu pri použití viacerých metód chladenia, či už sa jedná o suché obrábanie, konvenčné alebo vysokotlakové chladenia [22].



Obr. 3.1.5.1 Vývoj teplôt pri sústružení s rôznymi stratégiami chladenia- závislosť teploty na čase obrábania [22]

Pri použití vysokotlakového chladenia je odvod tepla veľmi výrazný, a dôležitosť jeho použitia je preukázateľná. Bez chladenia procesnou kvapalinou vznikajú nebezpečne vysoké teploty.

3.2. Zhodnotenie účinkov na rezný proces

Vysokotlakové chladenie rezného procesu ovplyvňuje hneď niekoľko aspektov pri procese obrábania. Niektoré z nich zásadnejšie, na niektorých sa tento vplyv odzrkadlí len čiastočne, no nepochybne má veľký prínos v tejto oblasti. Či sa už jedná o opotrebenie nástroja, alebo o tvorbu triesky, na základe prebehnutých experimentov a publikácií v predošlej kapitole možno tvrdiť, že vysokotlakové chladenie výrazne ovplyvnilo rezný proces.

Opotrebenie nástroja, a teda z neho vyplývajúca životnosť nástroja sa niekoľkonásobne predĺžila pri aplikácii vysokotlakového chladenia, aj keď je nutné podotknúť, že tento jav môžeme pozorovať len do určitej hodnoty reznej rýchlosti, nakoľko pri veľmi vysokých rezných rýchlostiach už rozdiel v metódach chladenia úplne zaniká, a opotrebenie nástroja rastie extrémne rýchlo. Je teda jasné, že životnosť nástroja je úmerná reznej rýchlosti. Vďaka vysokotlakovému chladeniu môžeme zvyšovať rezné rýchlosti aj pri obrábaní problematicky obrobiteľných materiálov, no aj tu platí, že ju

môžeme zvyšovať len do určitej hranice. Za touto hranicou sa už obrábania stáva ekonomicky nevýhodné, a životnosť nástroja je veľmi nízka. Vďaka vyšším rezným rýchlostiam, možným vyvinúť pri použití vysokotlakového chladeniu, je výroba produktívnejšia a energeticky efektívnejšia.

Vďaka ďalším vplyvom ako je tvorba segmentovanejšej triesky, schopnosť dosiahnuť výborné výsledky vzhľadom na drsnosť obrobeného povrchu a účinnému chladeniu je možné tvrdiť, že celý proces obrábania sa stáva stabilnejší. Je nemožné obrábať, či už sústružiť alebo frézovať, húževnaté materiály ako sú zliatiny niklu a titánu, bez chladenia procesnou kvapalinou. V dnešnej dobe sa kladie dôraz predovšetkým na produktivitu a efektívnosť výroby, a tú je vysokotlakové chladenie schopné zabezpečiť. Dokonca, pri aplikovaní tohto typu chladenia bola preukázaná redukcia spotreby procesnej kvapaliny, a to je ďalšou výhodou, ktorú prináša toto riešenie.

V predošlej kapitole boli detailnejšie opísané vplyvy chladenia procesnou kvapalinou s vysokým tlakom. Dosiahnuté výsledky sa v niektorých prípadoch líšili. Je nutné spomenúť, že niektoré zo spomenutých publikácií vykazovali odlišné zistenia a teda nie je možné určiť optimálnu hodnotu tlaku procesnej kvapaliny, pri ktorom by boli všetky tieto zistenia dosiahnuteľné. Jednotlivé experimenty boli zrealizované za rozdielnych podmienok a s rozdielnymi materiálmi. Či sa už jedná o materiál, ktorý bol obrábaný alebo nástrojový materiál. Obrábane boli vo väčšine prípadov zliatiny niklu či titánu, prípadne niektoré druhy koroziivzdorných ocelí. Na obrábanie takýchto húževnatých materiálov sa vo väčšine prípadov používa ako nástrojový materiál spekaný karbid, nakoľko použitie tohto materiálu je najvýhodnejšie. Možno teda skonštatovať, že výsledky experimentov výrazne podliehajú nastaveniu rezných podmienok a výberu materiálu, a pre jednotlivé materiály a rezné podmienky sú dosiahnuté značne rozdielne závery.

Z týchto tvrdení vyplýva, že ak by chcel technológ, projektujúci návrh výroby určitej súčasti, do technologického plánu zakomponovať vysokotlakové chladenie, je nutné brať do úvahy veľké množstvo aspektov, vyššie spomenutých. Až na základe analýzy týchto údajov je schopný určiť optimálny tlak procesnej kvapaliny a navrhnuť tak plán výroby, ktorý by spĺňal požiadavky na produktivitu a ekonomickú hospodárnosť.

Na základe všetkých týchto zistení a analýz, sa pokúsime navrhnuť experiment, ktorý by objektívnejšie dokázal preukázať pravosť a pravdivosť zistení, a zohľadniť energetickú náročnosť aplikácie vysokotlakového chladenia do procesu obrábania.

4. Návrh experimentu

Cieľom experimentu bude overiť zistenia, vyplývajúce z predošlej kapitoly. Avšak, na rozdiel od ostatných spomenutých publikácií, zaoberajúcimi sa vplyvmi vysokotlakového chladenia, ako je opotrebenie nástroja či drsnosť obrobenej plochy, v našom experimente bude zohľadnená aj energetická náročnosť použitia vysokotlakového chladenia, a teda z nej vyplývajúca ekonomická hospodárnosť.

Ako už bolo spomenuté, vplyvy vysokotlakového chladenia sa v mnohých experimentoch a publikáciách líšili, a to hlavne z dôvodu rozdielnych nastavení rezných parametrov a voľby materiálov. Úlohou bude teda overiť tieto zistenia a určiť, ako zásadne ovplyvňuje vysokotlakové chladenie opotrebenie nástroja, rezné sily či tvorbu triesky.

Podstatou experimentu bude frézovanie ťažkoobrobiteľného materiálu a následná analýza dát, ktorá by preukázala nakoľko sú spomínané vplyvy zásadné pre proces obrábania.

V prvom rade je potrebné zadefinovať základne parametre experimentu. Obrábaný bude jednoznačne jeden z ťažkoobrobiteľných materiálov, ako sú zliatiny titánu, niklu alebo niektoré typy korozivzdorných ocelí. Následne je dôležitá voľba rezného nástroja, nakoľko výsledky sú pre každý nástroj rozdielne, či sa jedná o nástroj monolitný alebo s vymeniteľnými britovými doštičkami. Nástrojom pre náš experiment bude stopková fréza s vnútorným chladením, a teda kvapalina bude privádzaná stredom vretena. Nástrojovým materiálom bude povlakovaný spekaný karbid. Zadefinujú sa dráhy nástroja a rezné podmienky, nakoľko výsledky experimentu podliehajú aj týmto parametrom. Ďalším aspektom, ktorý je potrebné definovať je dodávka procesnej kvapaliny, teda aký tlak/prietok použijeme, ďalej o aký typ procesnej kvapaliny sa bude jednať.

Vyhodnocované bude opotrebenie nástroja, pričom nástroj prejde po predom zadefinovaných dráhach a zmeria sa opotrebenie. Následne sa tento proces niekoľko krát zopakuje, a bude možné sledovať rastúce opotrebenie. Rezné sily budú merané pomocou dynamometra, a to v troch osiach. Vznikajúcu triesku vyhodnotíme vizuálne a bude možné sledovať, ako sa bude meniť pri rastúcom tlaku procesnej kvapaliny. Posledným vyhodnocovaným parametrom bude energetická náročnosť, a teda spotreba energie na vretene stroja a na čerpadle, ktoré privádza kvapalinu do miesta rezu.

Z nameraných a vyhodnotených údajov vytvoríme závislosť opotrebenia na čase, kde bude znázornené rastúce opotrebenie nástroja, a týchto závislostí vytvoríme niekoľko pre rôzne nastavenie tlaku, respektíve prietoku procesnej kvapaliny. Ďalšou závislosťou budú rezné sily na čase. Tu bude možné sledovať, ako sa budú rezné sily vyvíjať s rastúcim opotrebením nástroja, pri nastavení rôznych tlakov/prietokov.

Takto nám vzniknú dve závislosti, ktoré preukážu vplyv vysokotlakového chladenia pri nastavení rôznych tlakov a bude možné sledovať, ako sa tieto parametre budú meniť s rastúcim tlakom. Pre objektivnosť nameriame a zostavíme dve ďalšie rovnaké závislosti, pričom zmeníme rezné podmienky, ako je rezná rýchlosť alebo posuv a výsledky porovnáme.

Hlavným zámerom experimentu bude sledovanie energetickej náročnosti celého procesu. Zaujímavým zistením bude, ako sa bude spotreba energie na vretene meniť s vplyvmi vysokotlakového chladenia na rezný proces, napríklad s rastúcim opotrebením nástroja. Je potrebné však zdôrazniť, že na celkovú energetickú náročnosť procesu bude vplývať okrem spotreby na vretene stroja aj spotreba energie na čerpadle, dodávajúcom procesnú kvapalinu. Tá sa bude meniť s rastúcim tlakom, respektíve prietokom.

Záver

Chladienie rezného procesu procesnou kvapalinou je výhodne hneď z niekoľkých hľadísk. Procesná kvapalina je schopná účinne chladíť rezný proces, a taktiež má dobré mazacie vlastnosti. Významne ovplyvňuje akosť obrobenej plochy, predlžuje životnosť nástroja a pomáha k odvodu triesky z miesta rezu.

Avšak, v prípadoch, kedy obrábame ťažkoobrobiteľné materiály, konvenčné chladienie procesnou kvapalinou nie je dostačujúce. Pri obrábaní sa generuje veľké množstvo tepla, ktoré môže poškodiť nástroj a mať nebezpečný vplyv na celý proces.

Z takého dôvodu sa prechádza k chladieniu vysokým tlakom procesnej kvapaliny. Na rozdiel od konvenčného chladienia, vysokotlakové chladienie prináša celú radu výhod. Ide o veľmi účinné chladienie, ktoré je schopné efektívne odvádzať teplo z miesta rezu a je tak možné obrábať s vyššími reznými rýchlosťami. Významne sa predlžuje životnosť nástroja, vznikajúca trieska je segmentovanejšia a účinne odvádzaná z miesta rezu. Rezné sily sú nižšie, a to hlavne pri vyšších rezných rýchlostiach.

Najväčší výrobcovia nástrojov na trhu sa taktiež zaoberajú technológiu vysokotlakového chladienia, a vo svojich katalógoch uvádzajú nástroje určené pre použitie tejto technológie. Zaujímavý je fakt, že každý výrobca uvádza mierne odlišné hodnoty tlaku ako optimálne pre použitie vysokotlakového chladienia.

Vplyvmi vysokotlakového chladienia sa zaoberalo už veľké množstvo vedcov z danej oblasti a prebehlo niekoľko experimentov, v ktorých sú zohľadnené najzásadnejšie vplyvy vysokotlakového chladienia. Jedná sa o opotrebenie nástroja, rezné sily, drsnosť obrobenej plochy, vznikajúcu trieska a teplotu. Avšak, ani na základe veľkého množstva publikácií, zaoberajúcimi sa danou problematikou, nie je možné jednoznačne určiť ideálnu hodnotu tlaku procesnej kvapaliny.

V poslednej kapitole som navrhol experiment, ktorý by objektívne preukázal, nakoľko sú tieto vplyvy zásadné pre rezný proces. Hlavným zámerom tohto experimentu je predovšetkým sledovanie energetickej náročnosti celého procesu pri použití vysokotlakového chladienia, nakoľko ani v jednom z už prebehnutých experimentov táto závislosť nebola zohľadnená, no pre aplikáciu vysokotlakového chladienia do procesu obrábania má zásadný vplyv.

Prínos vysokotlakového chladienia je nespochybniteľný, a určite bude zaujímavé pozorovať, akým smerom sa bude táto technológia ďalej vyvíjať, keďže momentálne je trend postupného navyšovanie tlaku dodávanej procesnej kvapaliny.

Zoznam použitej literatúry

- [1] HUMÁR, Anton. *Technologie 1 – Technologie obrábění – 1. část*. [přednáška]. Brno: VUT, 2003.
- [2] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: ČVUT, 1989. 156 s.
- [3] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie. Obrábění*. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s. r. o. Brno, 2004. 227 s. ISBN 80-214-2562-8
- [4] *Cryogenic Machining Eliminates Moldmaking Conundrum* [online]. 2015 [cit. 2017-06-27]. Dostupné z: <http://www.moldmakingtechnology.com/articles/cryogenic-machining-eliminates-moldmaking-conundrum>
- [5] *Výhody vysokotlakého chladicího systému* [online]. [cit. 2017-06-27]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/featured-articles/Pages/benefits-of-high-pressure-coolant.aspx?Country=cz>
- [6] *Súčasné trendy v oblasti kvapalín pre obrábanie kovov* [online]. [cit. 2017-06-27]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42010/fuchs.html>
- [7] BENES, James. *Is High-Pressure Coolant Worth It?* [online]. 2008 [cit. 2017-06-27]. Dostupné z: <http://americanmachinist.com/cutting-tools/high-pressure-coolant-worth-it>
- [8] *High pressure coolant machining: for better productivity and results*. AB Sandvik Coromant, 2010.
- [9] HNÍDEK, Milan. *Přínosy vysokotlakého chlazení při třískovém obrábění* [online]. 2013 [cit. 2017-06-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prinosy-vysokotlakeho-chlazení-pri-triskovem-obrabeni.html>
- [10] *JET HP CATALOG: Engineered for high pressure* [online]. 2014 [cit. 2017-06-28]. Dostupné z: http://www.iscar.com/Catalogs/publication-2016/JET_HP_CATALOG.pdf

- [11] *HPC Calculator* [online]. [cit. 2017-06-28]. Dostupné z: <http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/calculators/aero/HPC/index.html#>
- [12] *JETSTREAM TOOLING: COOLANT STRAIGHT TO THE EDGE* [online]. Švédsko, 2008 [cit. 2017-06-28]. Dostupné z: <https://www.secotools.com>
- [13] *Walter Turn precision cooling: Cooling straight to the point* [online]. 2008 [cit. 2017-06-28]. Dostupné z: http://www.walter-tools.com/en-gb/tools/standard_products/turning/overview/iso_turning/turn-precision-cooling/pages/default.aspx
- [14] BERMINGHAM, M. J., S. PALANISAMY, D. MORR, R. ANDREWS a M. S. DARGUSCH. Advantages of milling and drilling Ti-6Al-4V components with high-pressure coolant. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, **72**(1-4), 77-88. DOI: 10.1007/s00170-014-5666-1. ISSN 0268-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-5666-1>
- [15] KUMAR, A. Senthil, M. RAHMAN a S. L. NG. Effect of High-Pressure Coolant on Machining Performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002. Dostupné také z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs001700200128>
- [16] LOPEZ DE LACALLE, L. N., J. PEREZ-BILBATUA, J. A. SANCHEZ, J. I. LLORENTE, A. GUTIERREZ a J. ALBÓ NIGA. Using High Pressure Coolant in the Drilling and Turning of Low Machinability Alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2000. Dostupné také z: <http://link.springer.com/article/10.1007/s001700050012>
- [17] DA SILVA, Rosemar B., Álisson R. MACHADO, Emmanuel O. EZUGWU, John BONNEY a Wisley F. SALES. Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. *Journal of Materials Processing Technology* 213. 2013. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013613000988>

- [18] GHARIBI, A. a Y. KAYNAK. *Tool Wear and Surface Quality in Machining Process of Stainless Steel: The Effects of Various Coolant Supply Pressures.*
- [19] VAGNORIUS, Zydrunas a Knut SØRBY. Effect of high-pressure cooling on life of SiAlON tools in machining of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011, **54**(1-4), 83-92. DOI: 10.1007/s00170-010-2944-4. ISSN 0268-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-010-2944-4>
- [20] BUSCH, Katja, Carsten HOCHMUTHA, Bernhard PAUSE, Andrea STOLL a Rafael WERTHEIMA. Investigation of cooling and lubrication strategies for machining high-temperature alloys. *Procedia CIRP* 41. 2016.
- [21] MOHD HADZLEY, A B., R. IZAMSHAH, A. SITI SARAH a M. NURUL FATIN. Finite Element Model of Machining with High Pressure Coolant for Ti- 6Al-4V alloy. *Procedia Engineering* 53 [online]. 2013. [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813001999?via%3Dihub>
- [22] KRAMAR, Davorin a Janez KOPAČ. High Pressure Cooling in the Machining of Hard-to-Machine Materials. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2009 [cit. 2017-07-02].