



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ VYSOKOTLAKÉHO CHLAZENÍ NA DLOUHOTOČNÝCH AUTOMATECH

USE OF HIGH-PRESSURE COOLING SYSTEM FOR LONG-TURN
MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jiří KINC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Josef SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Kinc

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití vysokotlakého chlazení na dlouhotočných automatech

v anglickém jazyce:

Use of High-pressure Cooling System for Long-turn Machines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor problému
3. Návrh experimentálních zkoušek s použitím vysokotlakého chlazení
4. Realizace experimentů
5. Porovnání výsledků experimentu se současně používanou technologií
6. Diskuse výsledků
7. Závěr

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce bude analýza a aplikace technologie vysokotlakého chlazení pro výrobu součástí na dlouhotočných automatech. Praktická část práce bude zkoumat reálně soustružený obrobek s využitím technologie vysokotlakého chlazení. Takto chlazený obrobek bude následně porovnán s obrobkem soustruženým bez použití vysokotlakého chlazení. V práci budou charakterizovány zjištěné rozdíly mezi soustruženými obrobky, včetně kalkulace nákladů a doporučení, zda budou přínosy při použití vysokotlakého chlazení natolik velké, že se vyplatí investovat a technologii nakoupit i na další pracoviště. Práce bude ukončena diskusí a celkovým zhodnocením inovačního procesu, který spočívá v aplikaci technologie vysokotlakého chlazení na dlouhotočných automatech.

Seznam odborné literatury:

1. PÍŠKA, M. a kol. Speciální technologie obrábění. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. HUMÁR, A. Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění. 1. vydání. Brno: CCB, s.r.o., 1995. 256 s. ISBN 80-85825-10-4.
4. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
5. AB SANDVIK COROMANT. Produktivní obrábění kovů. Sandvik Coromant, technické vyd. Švédsko: CMSE, 1997. 300 s. S-811 81 Sandviken, Švédsko.
6. KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce popisuje vysokotlaké chlazení a následně prezentuje experiment, kdy je s využitím této technologie chlazení soustružen vnější válcový průměr na dlouhotočném automatu. Takto soustružený obrobek je porovnán s obrobkem soustruženým bez použití vysokotlakého chlazení. Získané výsledky jsou analyzovány, vyhodnoceny a vyneseny do jednotlivých grafických závislostí. Práce je ukončena rozborem, diskusí a celkovým doporučením ohledně používání vysokotlakého chlazení.

Klíčová slova

Chlazení, vysokotlaké chlazení, dlouhotočné automaty, soustružení

ABSTRACT

The thesis describe high-pressure cooling system and present experiment, when is using this cooling technology for turning cylindrical workpiece to long-turn machines. Workpiece manufactured using high-pressure cooling system is compares with Workpiece manufactured using low-pressure cooling system. Results are analyzed, evaluated and plotted in a single graphical relationships. The thesis is completed the analysis, discussion and recommendations regarding the using of high-pressure cooling.

Key words

cooling system, high-pressure cooling system, long-turn machines, turning

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KINC, J. *Využití vysokotlakého chlazení na dlouhotočných automatech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Využití vysokotlakého chlazení na dlouhotočných automatech** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

29. 5. 2015

Datum

Bc. Jiří Kinc

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji společnosti, ve které jsem zpracovával experimentální zkoušky, zejména panu Zdeňku Procházkovi a panu Ing. Richardu Jamborovi. Moje další poděkování míří mé rodině a především rodičům za pomoc a podporu při studiu a za cenné rady do osobního i profesního života.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 TEPLO A TEPLOTA OBRÁBĚNÍ.....	10
1.1 Obrábění.....	10
1.2 Práce a výkon při řezání.....	11
1.3 Teplota a teplota.....	12
2 ŘEZNÉ KAPALINY A JEJICH VÝZNAM PŘI OBRÁBĚNÍ.....	15
2.1 Volba řezné kapaliny	15
2.2 Vlastnosti a funkce řezných kapalin	16
2.2.1 Funkce řezných kapalin	16
2.3 Dělení řezných kapalin	18
3 VYSOKOTLAKÉ CHLAZENÍ.....	22
3.1 Princip vysokotlakého chlazení	22
3.2 Parametry vysokotlakého chlazení	24
3.2.1 Tlaky a objemy vysokotlakého chlazení.....	24
3.2.2 Proměnlivé a stálé nastavení tlaku.....	24
3.3 Použití vysokotlakého chlazení u obráběcích operací	25
3.4 Čištění chladicí kapaliny.....	27
4 DLOUHOTOČNÉ AUTOMATY	30
5 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY S POUŽITÍM VYSOKOTLAKÉHO CHLAZENÍ	32
5.1 Předmět experimentu	32
5.2 Vstupní parametry experimentu.....	33
5.2.1 Stroj.....	33
5.2.2 Zařízení na vysokotlaké chlazení.....	33
5.2.3 Řezná kapalina	33
5.2.4 Materiál	33
5.2.5 Obrobek	34
5.2.6 Nástroje.....	34
5.3 Měřicí přístroje a metody měření.....	36
6 PRŮBĚH EXPERIMENTŮ	38
6.1 Soustružení průměru 3 mm.....	38

6.1.1 Řezné podmínky	38
6.1.2 Výsledky pro tlak 10 MPa	38
6.1.3 Výsledky pro tlak 5 MPa	40
6.1.4 Výsledky bez použití vysokotlakého chlazení.....	41
6.2 Soustružení průměru 4,5 mm.....	43
6.2.1 Řezné podmínky	43
6.2.2 Výsledky pro tlak 10 MPa	43
6.2.3 Výsledky pro tlak 5 MPa	45
6.2.4 Výsledky bez použití vysokotlakého chlazení.....	47
6.3 Soustružení průměru 6 mm.....	50
6.3.1 Řezné podmínky	50
6.3.2 Výsledky pro tlak 10 MPa	50
6.3.3 Výsledky pro tlak 5 MPa	51
6.3.4 Výsledky bez použití vysokotlakého chlazení.....	54
6.4 Rozšíření experimentu o pozorování průměru 4,5 mm	56
6.4.1 Trvanlivost nástrojů	56
6.4.1 Soustružení průměru 4,5 mm jedním nástrojem.....	57
7 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	59
7.1 Společné ukazatele.....	59
7.2 Kalkulace pro průměr 3 mm	59
7.3 Kalkulace pro průměr 4,5 mm	61
7.4 Kalkulace pro průměr 6 mm	63
8 DISKUZE VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU – POROVNÁNÍ SE SOUČASNĚ POUŽÍVANOU TECHNOLOGIÍ	64
ZÁVĚR	67
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	68
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	70
SEZNAM PŘÍLOH.....	73

ÚVOD

V dnešní době se ve světě podnikání velmi často skloňuje slovo konkurenceschopnost. V první řadě to znamená, že chce-li firma existovat, musí si pro svoje výrobky najít dostatečně velký počet zákazníků, aby byla schopna platit svoje náklady. S přibývajícím konkurenceschopností roste i počet zákazníků a začíná tak růst i zisk firmy. Zjednodušeně se tedy dá říct, že kdo osloví více zákazníků, bude mít více zisku a bude více konkurenceschopný.

U firem, které se věnují výrobě a prodeji statků je ukazatelem konkurenceschopnosti především cena, za jakou se jejich výrobky prodávají. V dnešní době je tlak na neustálé hledání úspor a snižování nákladů, takže se dá říct, že se ziskovost výrobků snižuje a ceny čím dál více odpovídají nákladům na výrobu. Firmy hledají cesty jak vyrábět a nakupovat levněji, čímž se dostávají do začarovaného kruhu.

Velkou roli v tomto procesu hraje inovace a nákup technologií, které firmy dokážou začlenit do svých výrobních postupů. Firmy, které se k technologiím dostanou mezi prvními, mají výhodu, sníží si výrobní náklady, ale prodávají za stejné ceny, tedy vzrostou jim zisky. Časem, po rozšíření inovací i do konkurenčních firem, musí i ony s cenou dolů, ale využily příležitosti a z vydělaných peněz mohou opět inovovat a vydělávat.

Když se objevila technologie vysokotlakého chlazení, která tvrdila, že dokáže zkrátit výrobní časy o desítky procent, bylo to především u firem, které vyrábí v objemu milionů kusů, důvodem k zamyšlení, zda tuto technologii nepořídit.

Jedna věc je ovšem, co slibují prospekty a výrobci vysokotlakých jednotek a druhá věc je, jaký reální dopad má vysokotlaké chlazení na výrobu, což zkoumá tato diplomová práce.

Autor práce se dostal ke spolupráci s firmou, která přesně odpovídá výše popsanému problému. Trh tlačí na ceny výrobků firmy, která vyrábí v objemech milionů kusu a každá uspořené sekunda má ve výsledku velkou váhu. Nákup vysokotlakých jednotek se přímo nabízí.

Autor práce oceňuje nabídku firmy podílet se na vyčíslování úspor a na tvorbě podkladů pro rozhodování, zda jsou přínosy tak veliké, jak je inzerováno, a zda je tedy výhodné technologii pořídit.

Autora práce zaujal především fakt, že se experiment bude konat v reálném provozu firmy na reálných výrobcích. Nepůjde o pokus na pár desítkách kusech, ale na několika tisíci kusech, přičemž naměřené a získané hodnoty budou zahrnuty do investičního rozhodování firmy.

1 TEPLA A TEPLOTA OBRÁBĚNÍ

1.1 Obrábění

Obráběcí proces je proces, při kterém vhodnou obráběcí metodou dostáváme z výchozího tvaru (polotovaru) odebráním částic materiálu (třísek) požadovaný konečný tvar (obrobek) s cílem vytvořit na obrobku plochy u kterých se požaduje [1]:

tvar (úchytky přímosti, kruhovitosti a válcovitosti),

rozměr (úchytky od jmenovité hodnoty),

struktury (Rz, Ra, Rt),

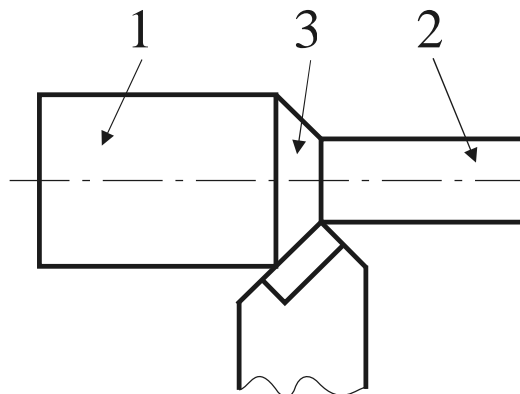
vlastnosti povrchové vrstvy,

přesnost poloh obrobekových ploch.

Při obrábění dochází k oddělování materiálu od polotovaru pomocí břitů nástroje. Tento fyzikálně mechanický proces se nazývá řezání, nebo řezný proces. Řezání lze dělit dle způsobu oddělování materiálu na kontinuální (souvislé, nepřetržité, trvalé) jako je soustružení, vrtání a vyvrtávání, nebo na diskontinuální (nesouvislé, přetržité, nespojité). Zástupci diskontinuálního řezného procesu jsou operace hoblování či obrážení. Dále ještě praxe rozlišuje řezný proces cyklický (pravidelně se opakující) jako je frézování či broušení. Řezný proces probíhá za určitých podmínek, které jsou zvané řezné podmínky [1].

Polotovar je materiál, který se bude obrábět. Existují polotovary normalizované, jako jsou tyče, různé profily, plechy, pásy, trubky, dráty, válcované profily aj. a polotovary nenormalizované jako odlitky, výkovky, výlisky, svařence, pájené polotovary, slinuté polotovary lepené polotovary [1].

Obrobek je obráběná, částečně obrobeková, nebo již zcela obrobeková součást. Je charakterizován obrobekovou, obráběnou a přechodovou plochou viz obr. 1 [1].



Obr. 1 Plochy na obrobku 1 - obráběná, 2 – obrobeková, 3 - přechodová [1].

Obráběná plocha je plocha, kterou se nástroj chystá obrábět, obrobeková plocha již prošla procesem a přechodová plocha je plocha, na kterou zrovna působí břit nástroje během otáčky nebo zdvihu nástroje, či obrobku [1].

Nástroj při kontaktu z obrobkem realizuje řezný proces. Nástroj je tvořen řeznou částí, břitem a základnou. Řezná část obsahuje ostří, čelo a hřbet a je to funkční část, která při

kontaktu s obrobkem tvoří třísku. Břit je potom mezi čelem a hřbetem nástroje. Základna je plochá část nástroje, za kterou se nástroj upíná a pomocí níž se s nástrojem manipuluje. Ne všechny nástroje mají jednoznačně určenou základnu [1].

1.2 Práce a výkon při řezání

Při obrábění je nutno vynaložit k oddělení třísky z materiálu obrobku určitou práci. Tato práce se nazývá **Práce řezného procesu**. Vzorec pro výpočet práce je v následujícím tvaru [1, 2].

$$E_e = E_{pl} + E_{el} + E_t + E_{ed} \quad [J] \quad (1.1)$$

Kde jednotlivé složky představují:

E_{pl} je práce nutná k překonání plastických deformací, tvoří 50 – 80 % z E_e ,

E_{el} je práce nutná k překonání elastických deformací, tvoří 5 – 10 % z E_e .

E_t je práce nutná k překonání tření mezi nástrojem a obrobkem. Skládá se složek E_γ (překonání tření třísky po čele nástroje) a E_α (překonání tření hřbetu nástroje po řezné ploše), které se mezi sebou sčítají. Tvoří okolo 20 – 40 % z E_e [1, 2].

$$E_t = E_\gamma + E_\alpha \quad [J] \quad (1.2)$$

E_{ed} je disperzní práce, tedy práce nutná k vytvoření nových povrchů, tvoří okolo 1 % z E_e [1, 2].

Práce potřebná k zajištění hlavního posunu při obrábění se nazývá **Práce řezání** a má obecný tvar [1]:

$$E_c = \int_0^t F_c \cdot v_c \cdot dt \quad (1.3)$$

Vzorec pro práci řezání lze dále upravovat pro jednotlivé druhy obrábění, například pro soustružení válcové plochy má tvar: [1]

$$E_c = F_c \cdot v_c \cdot t_p \quad [J] \quad (1.4)$$

Kde jednotlivé složky představují [1, 2]:

F_c je řezná síla [N],

v_c je řezná rychlost [min^{-1}],

t_p je čas řezného procesu [min].

Další prací vyskytující se při řezání je **Práce posuvu**, práce je potřebná k zajištění posuvového pohybu za účelem obrábění materiálu a má tvar [1].

$$E_f = \int_0^t F_f \cdot v_f \cdot dt \quad (1.5)$$

I tento vzorec pro výpočet lze upravit pro jednotlivé obráběcí operace, třeba pro soustružení válcové plochy je ve tvaru [1, 2]:

$$E_f = F_f \cdot v_f \cdot t_p \quad [J] \quad (1.6)$$

Kde jednotlivé složky představují [1, 2]:

F_f je posuvová síla [N],

v_f je posuvová rychlost [min^{-1}],

t_p je čas řezného procesu [min].

Práci řezného procesu pro soustružení válcové plochy lze přepsat i do následujícího vzorce [1, 2]:

$$E_e = (F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f) \cdot t_p \quad [J] \quad (1.7)$$

Pracovní výkon je dán součinem pracovní síly a rychlosti [2].

$$P_e = \frac{F_e \cdot v_e}{60} \quad [W] \quad (1.8)$$

Kde F_e je velikost výsledné řezné síly a v_e je velikost výslední řezné rychlosti [2].

$$F_e = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad [N] \quad (1.9)$$

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\text{m/min}] \quad (1.10)$$

1.3 Teplo a teplota

Prakticky veškerá energie E_e se během procesu obrábění transformuje na energii teplenou (95 až 98 %). Ostatní energie, která se na energii teplenou nepřemění, je uložena v povrchu obrobku jako zbytková napjatost a odvedena do třísek jako deformační energie. Celková teplená energie Q se dá rozepsat na několik složek [2]:

$$Q = Q_{sh} + Q_\gamma + Q_\alpha + Q_{ch} \approx E_e \quad [J] \quad (1.11)$$

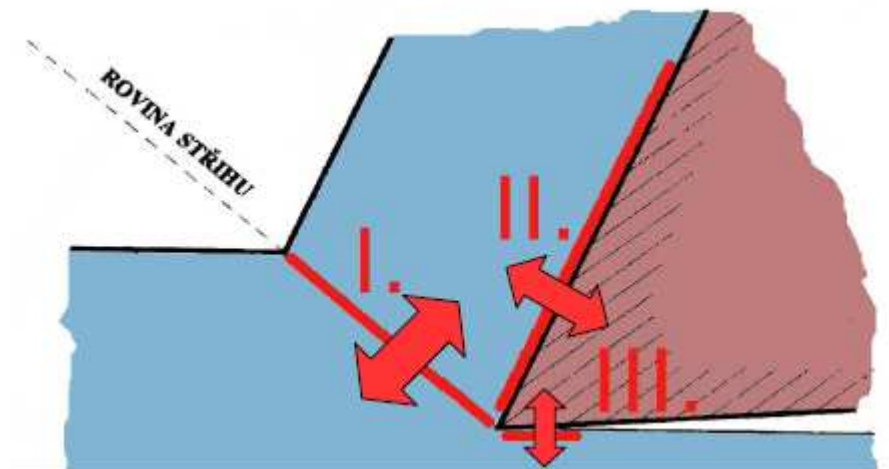
Kde jednotlivé složky představují [2]:

Q_{sh} je teplo od plastické deformace ve smykové rovině,

Q_γ je teplo od tření mezi třískou a čelem nástroje,

Q_α je teplo od tření mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje,

Q_{ch} je teplo od utváření a dělení třísky.



Obr. 2 Oblasti vzniku tepla při obrábění [3].

Teplo při obrábění vzniká ve třech oblastech, viz obr. 2:

I. Rovina stříhu – oblast plastické deformace,

II. Oblast tření třísky po čele nástroje,

III. Oblast plastické deformace pod špičkou nástroje a tření malé části hřbetu nástroje o obrobek [3].

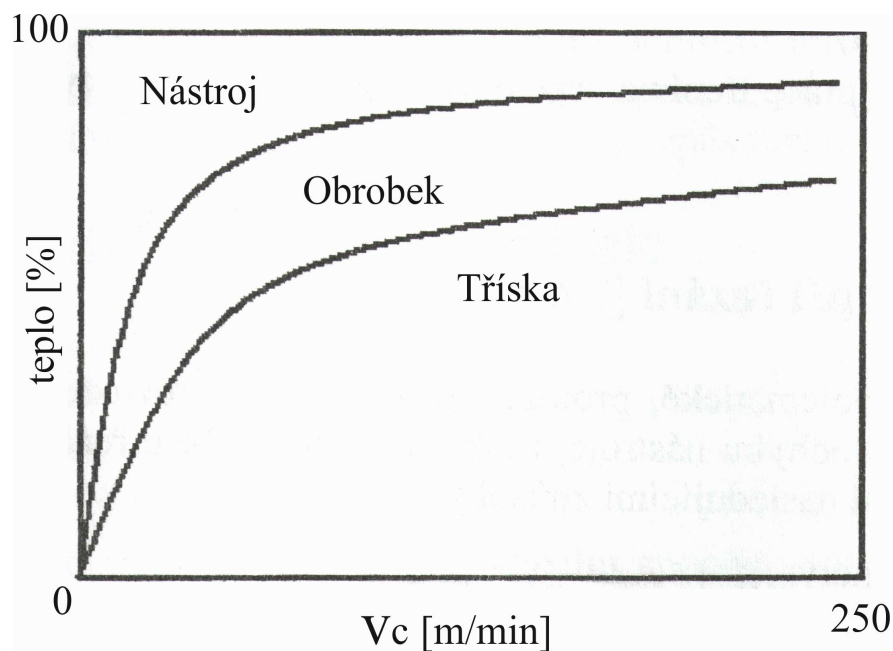
Teplo, které se během obrábění tvoří, negativně ovlivňuje celý proces řezání [2]:

- nepříznivě působí na nástroje, především na řezné vlastnosti,
- ovlivňuje mechanické vlastnosti obrobku,
- ovlivňuje pěchování a zpevnění obráběného materiálu,
- působí na podmínky tření na nástroji (na čele a hřbetu).

Teplo, které se během obrábění vytvoří, je odvedeno pryč z místa řezu přes čtyři věci a to do [1]:

- třísky,
- obrobku,
- nástroje,
- okolí.

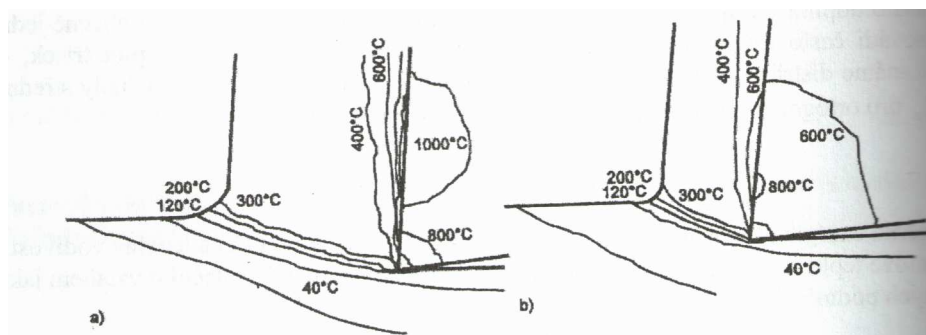
Kolik tepla se při obrábění odvede do jaké složky, je závislé na několika faktorech. Na řezných podmínkách (hlavně řezné rychlosti), na způsobu a druhu mazání a chlazení, na geometrii řezného nástroje, viz obr. 3.



Obr. 3 Grafická závislost distribuce tepla v závislosti na řezné rychlosti – bez chlazení [2].

V nejlepším případě je největší část tepla z místa řezu odvedena třískou (především u soustružení), zároveň je snaha, aby byla tříska v co nejkratším kontaktu s nástrojem, protože mu předává teplo. Chtěný je rovněž odvod tepla do okolí, proto se u většiny obráběcích operací se lze setkat s chlazením či mazáním místa řezu. Vzniklé teplo se pomocí mazání a chlazení rychleji odvádí od místa řezu a zároveň se celá soustava ohlazuje. Tím se zvětšuje životnost nástroje a tedy i ekonomická hospodárnost celého procesu [1, 2].

Při obrábění menší řeznou rychlostí se maximální teplota vyskytuje na špičce nástroje, při růstu řezné rychlosti se maximální teplota vyskytuje v určité vzdálenosti od ostří nástroje. Zachyceno je to na obr. 4, kde v případě a) jde o obrábění větší rychlostí než v případě b) [1, 2].



Obr. 4 Teplota na nástroji při obrábění [2].

2 ŘEZNÉ KAPALINY A JEJICH VÝZNAM PŘI OBRÁBĚNÍ

Prostředí, ve kterém probíhá řezný proces, může výrazně ovlivnit části procesu, jako jsou tříška, teploty řezání, přesnost obrobené plochy, jakost obrobené plochy a trvanlivost nástroje. Zvolení vhodného prostředí pro obrábění je tedy významnou technologickou disciplínou. Prostředí nejčastěji tvoří kapaliny, plyny a pevné látky jako jsou pasty či grafit, nebo jejich kombinace jako je olejová mlha. Chladicí média slouží především k chlazení, mazání a čištění při obrábění. Použitím těchto médií dosahuje řezný proces lepších kvalitativních, kvantitativních i ekonomických výsledků [2].

Je nutno zmínit, že některé obráběcí operace, či obráběné materiály není nutno chladit – obrábějí se takzvaně za sucha. Jde například o obrábění litiny. Litina obsahuje grafit, což je tuhé mazivo. Dále o obrábění nástroji z řezné keramiky, která velmi špatně vede teplo. Naopak některé operace se bez chlazení a mazání v podstatě neobejdou, Jde o odvalování ozubených kol, vrtání hlubokých děr, protahování, broušení aj. [2].

2.1 Volba řezné kapaliny

Na volbu řezné kapaliny má vliv především řezný nástroj a obráběný materiál [1].

Řezný nástroj

Volba řezného nástroje probíhá podle několika aspektů, jako jsou materiál řezného nástroje, prováděná operace, objem výroby, vlastnosti obráběného materiálu aj. Použití určité řezné kapaliny může volbu nástroje usnadnit, nebo podle použitého nástroje je možno vybírat řeznou kapalinu. V dnešní době se obrábí především nástroji ze slinutých karbidů, které mohou pracovat i bez kapalin, dále existují nástroje keramické, kde není třeba chladit a nástroje z rychlořezné oceli, které je naopak nutno chladit vždy. Hlavní příčinou poškození nástroje je teplo, proto se i u nástrojů ze slinutých karbidů velice často vyskytuje chlazení. Teplo ovlivňuje pevnost a trvanlivost nástroje, vlivem většího tepla dochází k rychlejšímu opotřebování funkčních ploch nástroje. Nezanedbatelné jsou i mazací účinky řezných kapalin, které rovněž složí k prodloužení životnosti nástroje [1].

Obráběný materiál

Při volbě řezné kapaliny vzhledem k obráběnému materiálu je vhodné se řídit těmito pravidly [1]:

- čím větší je pevnost obráběného materiálu, tím dochází k většímu namáhání nástroje, proto je nutné v těchto případech volit kapalinu s větší koncentrací maziva. Tím je dosaženo zvýšení pevnosti mazací vrstvy,
- některé materiály (jako je například litina) lze snadno obrábět i za sucha, přidáním řezné kapaliny nám pomůže s lepším odvodem třísky z místa řezu a zamezení korozi,
- je nutné dbát na to, aby zvolená kapalina chemicky nereagovala s obráběným materiálem.

Nerezová ocel

Obrábí se těžce, použitím vhodných řezných kapalin může proces, dosáhnou lepší drsnosti povrchu a zvýšení řezné rychlosti [1].

Slitiny hliníku

Obrábí se dobře i bez použití řezných kapalin, řezná kapalina se používá hlavně pro zvětšení jakosti povrchu [1].

Slitiny hořčíku

Jsou dobře obrobitelné, při použití řezné kapaliny je třeba dbát na malou přítomnost kyselin a vody – jedná se o chemicky aktivní kov [1].

Obrobená plocha

Řezná kapalina má vliv na obrobenou plochu, může ovlivňovat rozměrovou přesnost, tvarovou přesnost, drsnost povrchu, objem plasticky deformované oblasti. Řezná kapalina pomáhá odstraňovat nárůstek na čele a tím zlepšovat drsnost povrchu, vhodně zvolená kapalina dokáže zlepšit drsnost povrchu o jednu až dvě třídy oproti obrábění za sucha [1].

Řezné kapaliny pomáhají zmenšovat hloubku zpevněné vrstvy po obrábění o 30 % až 40 % [1].

2.2 Vlastnosti a funkce řezných kapalin

Řezné kapaliny se dělí do dvou skupin na kapaliny s převážně mazacím účinkem a na kapaliny s převážně chladicím účinkem. S moderním přístupem k obrábění, kdy se neustále zvyšují rychlosti a úběry materiálu, je tlak i na vývoj řezných kapalin, tak aby plnily více funkcí najednou, ale stejně nelze říct, že dnes existuje jedna univerzální kapalina, vždy zaleží, co především proces od kapaliny potřebuje. Do popředí se dostávají kapaliny, které není nutno dále upravovat a mají dlouhou životnost [2].

2.2.1 Funkce řezných kapalin

Řezné kapaliny mají tyto účinky [2]:

- chladicí,
- mazací,
- čisticí,
- ochranný,
- snížení vibrací stroje.

Chladicí účinek

Chlazení probíhá, když kapalina odvádí teplo vzniklé řezáním z místa řezu. Chlazení nastává tehdy, smáčí-li kapalina kov (obrobek a nástroj) a existuje-li teplený spád mezi povrhem obrobku a kapalinou. Kapalina se dostává do kontaktu s nástrojem, obrobkem a třískami a odvádí z nich teplo. Chladicí účinek je důležitý pro zvětšení životnosti nástroje a u obrobku zmenšuje rozměrovou nepřesnost – omezuje změnu rozměrů vlivem teplené dilatace [1, 2].

Chladicí účinek kapalin závisí na smáčecí schopnosti kapaliny, výparném teple, rychlosti vypařování, teplené vodivosti, měrném teple. Čím větší hodnoty tyto veličiny mají, tím bude chladicí účinek lepší [1, 2].

Mazací účinek

K mazání při obrábění dochází ve chvíli, kdy se mezi nástroj a obrobek přivede mazivo. Při obrábění dochází k vysokým tlakům, proto je dosaženo maximálně polosuchého mazání. Mazání se při obrábění zavádí pro snížení tření mezi obrobkem a nástrojem, řezných sil, opotřebením nástroje, energetické náročnosti procesu obrábění a zlepšení jakosti povrchu (hlavně drsnosti). Mazací účinek se tedy od kapalin očekává především u dokončovacích operací. Důležitým ukazatelem maziva je jeho viskozita a pevnost vytvořené mezní vrstvy. Zvětšování viskozity způsobuje ovšem horší pronikání maziva mezi obrobek a nástroj a zhoršuje i odvod tepla z místa řezu. Do maziva se přidávají i přísady, které zvětšují odolnost mazacího filmu. Jedná se o uhlovodíky, či sloučeniny fosforu, síry a chloru (tyto sloučeniny jsou ovšem dnes velmi omezovány vzhledem k jejich dopadu na životní prostředí) [1, 2].

Kombinovat chladicí a mazací účinek kapalin je velice důležité, obecně lze říct, že každá obráběcí operace potřebuje trochu jiný poměr, viz tab. 1 a obr. 5 [2].

Tab. 1 Volba kapaliny podle technologie [2].

Technologie	Doporučená kapalina
broušení, řezání strojnými pilami, jemné vyvrtávání	kapaliny převážně s chladicím účinkem
honování, lapování, frézování, vrtání, vyhrubování, soustružení, obrážení, frézování ozubení	kapaliny s chladicím i mazacím účinkem
broušení otvorů, vystružování, řezání závitů, hluboké vrtání, protahování	převážně ropné oleje s větším množstvím přísad



Obr. 5 Požadavky na kapaliny [1].

Čistící účinek

Čištěním se myslí odplavování třísek z místa řezu a případně i čištění řezného nástroje. Čištění nástroje je velice důležité u broušení, protože třísky ucpávají póry v brusném kotouči. Čistícím účinkem je i myšlena schopnost bránit slepování třísek a podporovat jejich usazování. Samotná kapalina se filtruje a opět přivádí do místa řezu, filtrace zabraňuje přivedení drobných třísek, které mohou působit jako abrazivum a poškozovat povrch obrobku [1, 2].

Ochranný účinek

Kapalina má chránit obrobek před vzdušnou vlhkostí při obrábění, nebo krátce po obrábění, a případnou korozi, to snižuje náklady na výrobu, protože se obrobky nemusí konzervovat. Kapalina nesmí být rovněž agresivní vůči stroji, nesmí rozpouštět nátěry stroje, poškozovat měřidla, vedení a těsnění [1, 2].

Zdravotní nezávadnost kapalin

Obsluha obráběcího stroje běžně přichází do styku s řeznou kapalinou, ta tedy nesmí ohrožovat zdraví. Nesmí způsobovat zápach, dráždit sliznici či pokožku. Důležitá je i hygienická prevence pracovníků, případně využití odsávání par, které vznikají při odpařování kapalin [1, 2].

2.3 Dělení řezných kapalin

Řezné kapaliny se dělí do dvou skupin, na chladicí kapaliny, u kterých převažuje chladicí účinek a na řezné oleje, u kterých převažuje účinek mazací. Chladicí kapaliny jsou převážně na vodní bázi, kdež to řezné oleje jsou na bázi olejů [1].

Řezné kapaliny se dále dělí na [1]:

- vodní roztoky,
- emulze,

- mastné oleje a tuky,
- minerální oleje,
- řezné oleje,
- syntetické kapaliny.

K chlazení lze dále využít [2]:

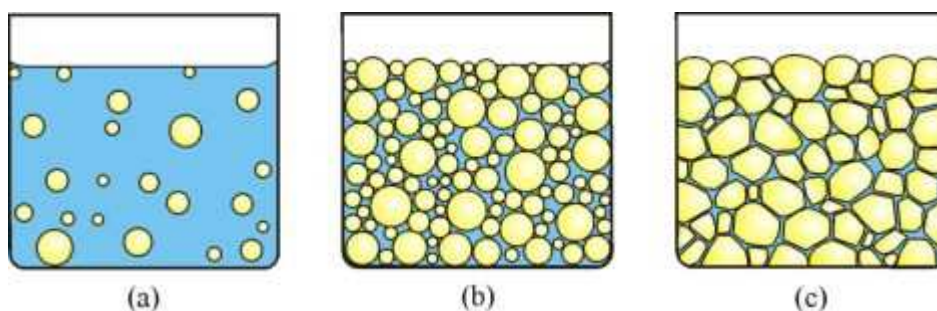
- chlazení plynem,
- chlazení řeznou mlhou,
- mazání pomocí pevných látek.

Vodní roztoky

Jsou nejlevnější a nejjednodušší řezné kapaliny, jejichž základem je voda, která výborně odvádí teplo, ale má minimální mazací účinek. Voda se navíc musí před použitím upravovat (změkčit, přidání přísad proti korozi a pění, přidání přísad pro zlepšení smáčivosti). Ve vodě se navíc mohou rozmnožovat bakterie, které poté zapáchají [1, 2].

Emulze

Voda má sama o sobě velice dobrý chladicí účinek, ale minimální účinek mazací, oproti tomu oleje mají velmi dobrý mazací účinek, ale horší účinek chladicí. Kombinací těchto dvou kapalin lze získat právě emulze. Obě složky (voda a olej) jsou v sobě nerozpustné, ale mohou tvořit disperzní soustavu, je třeba ovšem do směsi přidat ještě emulgátor, který stabilizuje emulzi. Olej ve vodě tvoří malé kapičky o velikosti 0,2 mm až 0,8 mm a díky přidání emulgátoru je bráněno jejich spojování. Kombinací oleje a vody dostává emulze výhody obou těchto kapalin i proto jsou emulze nejpoužívanější řeznou kapalinou. Chladicí účinek závisí na velikosti koncentrace emulze (viz obr. 6), čím více emulze obsahuje oleje, tím méně chladí [1, 2].



Obr. 6 Různé typy emulzí (a) zředěné, (b) koncentrované, (c) vysoce koncentrované (gelovité) [4].

Emulze kromě vody, oleje a emulgátoru obsahuje i další přísady jako, vysokotlaké přísady pro zlepšení olejového filmu, biocidy pro hubení mikroorganismu, řas a bakterií v emulzi, antikoroziční látky pro zlepšení ochrany obrobku proti korozi a antipěnící přísady [2].

Důležité je rovněž nezapomínat na stárnutí emulzí a jejich včasnou výměnu. Postupem času ztrácejí emulze svoje vlastnosti. Příčinou je okysličování emulze ze vzduchu, teplo a nečistoty. Důsledky stárnutí emulzí jsou spojování oleje do větších celků, zhoršení mazacího účinku, tvoření olejových skvrn na hladině emulze, větší pěnívost, tvorba bakterií a zápach. [2].

Mastné oleje a tuky

Jedná se o oleje živočišného či rostlinného původu, mají podobné vlastnosti jako oleje minerální, ale mají lepší smáčivost kovů a tím pádem i lepší chladicí účinky. Jejich nevýhodou je rychlé stárnutí, což se projevuje zvětšováním kyselosti olejů a tvorbou pryskyřic. Mezi používané oleje patří řepkový olej, ricinový olej, lněný olej [1].

Minerální oleje

Minerální oleje jsou výrobkem z ropy. Mají velice dobrý mazací účinek, ale slabý účinek chladicí. Mají velkou odolnost proti stárnutí [1].

Řezné oleje

Řezné oleje jsou vyráběny převážně z olejů minerálních. Řezné oleje mají různou viskozitu a podle toho i použití. Oleje s nízkou viskozitou se více hodí pro čištění, ale snadněji se rozprašují, což může vést k jejich vzplanutí, proto vyžadují větší hygienická a požární opatření [2].

Řezné oleje jsou limitovány především řeznou rychlostí, při velké řezné rychlosti (nad 80 m/min) se začnou pálit o odpařovat, proto se hodí nejlépe pro obrábění na automatech [2].

Do olejů je přidávají přísady na zlepšení, jsou to:

Mastné látky, jako mastné kapaliny a syntetické estery, které zlepšují přilnavost oleje a jeho mazací účinek [1].

Organické sloučeniny, jako sloučeniny některých prvků (síra, chlor, fosfor). Tyto látky se přidávají za účelem zmenšení tření mezi nástrojem a obrobkem při velkých tlacích a zároveň tvoří na povrchu obrobku vrstvičku kovových mýdel, které zabraňují mikrosvarům a zlepšují tření [1, 2].

Pevná maziva, jako grafit, zlepšují mazací účinky i za vysokých tlaků (díky své afinitě ke kovům). Jejich nevýhodou je, že se v oleji nerozpouští a musí se udržovat rozptýlené [1].

Syntetické kapaliny

Mají oproti olejům velkou stálost, ale menší mazací i chladicí účinek. Snadno se rozpouští ve vodě, nebo s ní tvoří emulzi. Mají dobrý ochranný účinek proti korozi a to již při malých koncentracích. Jejich čisticí účinek je velice dobrý, čehož se využívá při broušení, kde nezanáší brusný nástroj. Syntetické kapaliny netvoří při obrábění dým, jsou průhledné, takže se při jejich použití dá dobře sledovat průběh obrábění. Mezi zástupce patří polyglykoly a estery [2].

Chlazení plynem

Chlazení vzduchem se v praxi moc nevyužívá, nemá žádná mazací účinek a ni chladicí či čisticí účinek není moc velký. Pro chlazení plynem se používá CO₂, dusík, argon a freon, které se pod velkým tlakem (až 7 MPa) přivádí do místa řezu. U Oxidu uhličitého (CO₂) se využívá i podchlazení při kterém vzniká suchý led a ten zvětšuje teplotní spád mezi obrobkem, nástroje a okolím, to má za důsledek obrábění při nižších teplotách. Argon a freon, jsou netečné plyny, které pomáhají chránit místo řezu proti korozi. Chlazení plyny má vysoké náklady na používání, proto se používá k chlazení i vzduch, který se musí před použitím zbavit vlhkosti [2].

Chlazení řeznou mlhou

Jako řezná mlha se používá emulze či olej rozptýlený ve vzduchu. Ke smíchání oleje se stačeným vzduchem dojde ještě před přivedením do místa řezu. Do místa řezu se mlha přivádí tryskou při rychlosti až $300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ čímž se zvětšuje chladicí účinek (ten se může dále zvětšovat podchlazováním mlhy). Tryska je nasměrována na řeznou část nástroje. Chlazení mlhou se využívá například při broušení [2].

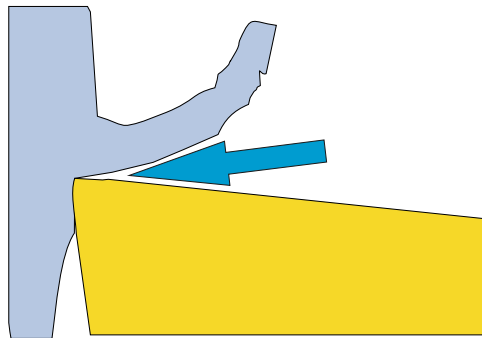
Mazání pomocí pevných látek

Mazáním pomocí pevných látek se využívá při náročných podmínkách, kdy je při obrábění dosahováno velkých tlaků. Používají se různé řezné pasty jako sirník molybdeničitý, smíchaný s olejem, nebo grafit s olejem či tukem. Dále se používají pasty s fosforem či sírou. Pasty vytvoří na povrchu obrobku mazací film. Problémem je, že pasty sirníku a grafitu utváření usazeniny a jejich použití je tedy limitováno [2].

3 VYSOKOTLAKÉ CHLAZENÍ

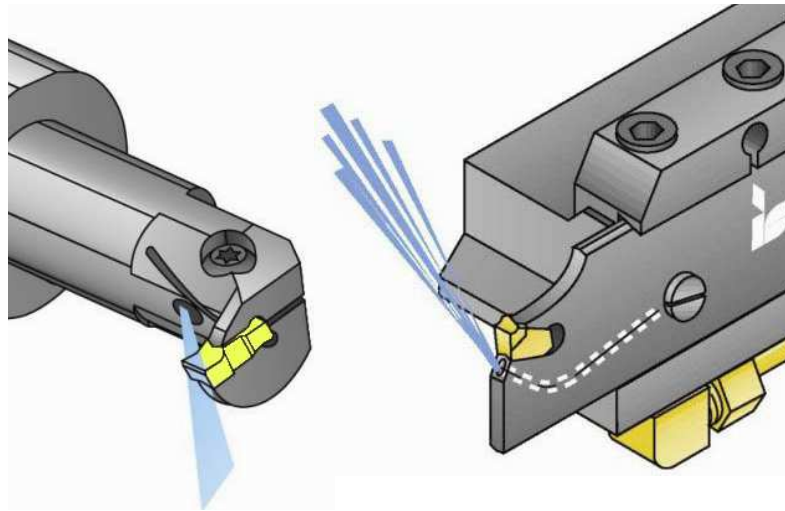
3.1 Princip vysokotlakého chlazení

Praxe ukazuje, že na způsobu přívodu řezné kapaliny k místu řezu velice záleží (viz obr. 7). Způsob přívodu ovlivňuje trvanlivost nástroje a jakost obrobeneé plochy. Během obrábění se na styku nástroje s obrobkem vytváří teplota 650 až 800 °C. Kapalína, která přijde do kontaktu s takovou teplotou, se rychle přemění v páru, která začne bránit přístupu nové kapaliny k ostří nástroje. Místo řezu se poté nedostatečně chladí a maže. Běžné chlazení není schopno prorazit bariéru ze vzniklých par, navíc nelze proud kapaliny příliš dobře nasměrovat do místa řezu. To umožňuje vysokotlaké chlazení, které přivede kapalinu do místa řezu pod tlakem, odvádí velké množství tepla, takže ke vzniku par dochází jen v omezeném množství a tlak kapaliny zajistí proražení případné parní bariéry. Vysokotlaké chlazení efektivně brání vzniku mikrosvarů na povrchu obrobku. Dochází i k dobrému mazání a čištění místa řezu od třísek, což vede ke zvýšení kvality obrobeneé povrchu, až o 100 %. Použití vysokotlaku umožní zvětšení řezné rychlosti až o 30 %, posuv je rovněž možné nastavit o 25 % větší než u konvenčního chlazení. Třísky se pod proudem kapaliny lépe lámou a je menší pravděpodobnost, že poškodí nástroj či obrobek. Menší tříška je dále výhodnější pro uskladnění a likvidaci. Nástroj se díky velice dobrému chlazení a mazání opotřebovává přirozeně a neničí se v důsledku přehřívání, což mu umožní vyrobit až dvojnásobek kusů jednou hranou [1, 7, 12].

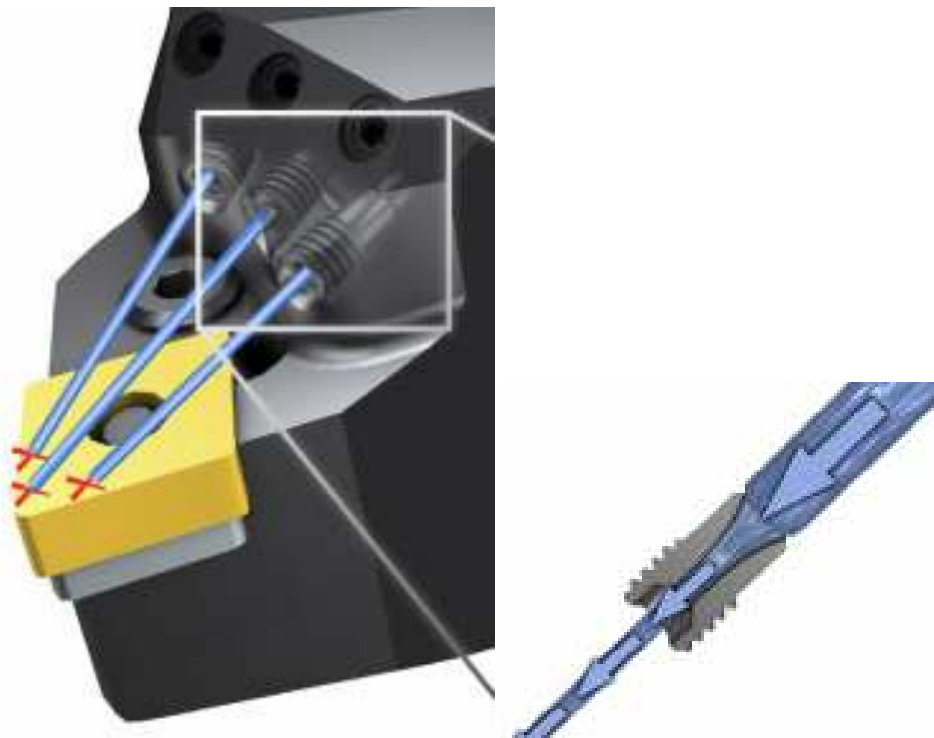


Obr. 7 přívod řezné kapaliny u vysokotlakého chlazení [11].

Systém pro vysokotlaké chlazení se v základu skládá ze stejných částí jako běžné chlazení. Obsahuje nádrž na chladicí kapalinu, která musí být poměrně dost veliká, protože se u vysokotlakého chlazení jsou přítomny větší objemy kapaliny. Dále z čerpadla, které rozvádí kapalinu po systému, případně zařízení na proměnlivé nastavení tlaku, trysky na přívod kapaliny do místa řezu. Trysky mají rozměr 0,3 až 1 mm a jsou buď přímo v těle nástroje či v těle nástrojového držáku, nebo jako přídavné zařízení na nástrojovém držáku (viz obr. 8). Mohou být jednoproudové či víceproudé (viz obr. 9), proud kapaliny může být paprsek, nebo kužel s rozstříkem od 5° do 65° [1]. Před návratem kapaliny do nádrže je zařazeno zařízení na čištění kapaliny (filtry a odstředivky kalu). Dále jsou v systému přítomny ventily, snímače pěnivosti a měřicí zařízení.



Obr. 8 Tryska pro vysokotlaké chlazení v nástrojovém držáku [10].



Obr. 9 Přívod kapaliny více tryskami a detail trysky [11].

Při použití řezných olejů, vzniká při obrábění olejová mlha, prostor stroje tedy musí být krytován a chráněn proti požáru. Na stroji je umístěno samohasicí zařízení, které v případě požáru napustí prostor stroje plynem a zabrání přístupu kyslíku k plamenům, čímž uhasí požár. Hasicí plyn je nebezpečný pro obsluhu stroje, je nedýchatelný. V případě, že se hasicí zařízení spustí je obsluha upozorněna zvukovým či světelným signálem a je povinná řídit se platným požárním předpisem pro dané pracoviště.

Shrnutí výhod vysokotlakého chlazení

- snížení strojních časů,
- nastavení větší řezné rychlosti až o desítky procent,

- větší produktivita obrábění,
- delší životnost nástroje, až o dvojnásobek oproti konvenčnímu chlazení,
- lepší tříska, menší rozměry třísky, lepší odvod třísky z místa řezu,
- efektivní chlazení a mazání procesu [9].

3.2 Parametry vysokotlakého chlazení

3.2.1 Tlaky a objemy vysokotlakého chlazení

Pro většinu obráběcích operací je tlak kolem 70 barů, tedy 7 MPa, tato hodnota je udávána, jako spodní hodnota tlaku potřebného k proražení parní bariéry, která vzniká při obrábění. Lze potkat tlaky i daleko větší až 100 MPa. V tomto případě je tříska již doslova tvářena proudem kapaliny. Pokud je třeba zjistit potřebný tlak a objem podrobněji, dá se řídit velikostí nástroje, okamžitým výkonem nástroje, konkrétní obráběcí operací (příklady v tab. 2). Především je třeba se ujistit, že nádrž disponuje dostatkem kapaliny. Je třeba zdůraznit, že výsledný efekt chlazení je podmíněn společným působením vysokého tlaku a velkého množství kapaliny [7].

Tab. 2 Příklady potřebných tlaků a průtoků pro obráběcí operace [7].

Operace	Množství kapaliny
Vyvrtávání	15 l na 1 cm průměru nástroje
Soustružení	2,36 l na 1 kW řezného výkonu nástroje
Frézování	2,36 l na 1 kW řezného výkonu nástroje

Obsluha stroje se musí ujistit, že v nádrži na kapalinu je dostatečně velké množství chladicí kapaliny. Například je-li soustružena součást, u které nástroj dosahuje výkonu 15 kW, je třeba pro operaci zajistit minimálně 36 litrů chladicí kapaliny.

3.2.2 Proměnlivé a stálé nastavení tlaku

Při pořízení systému vysokotlakého chlazení je třeba myslet i na možnosti regulace tlaku kapaliny před přívodem na nástroj. Existují dvě možnosti jak k této problematice v praxi přistoupit.

Stálé nastavení tlaku kapaliny

U zařízení se stálým tlakem, pracuje čerpadlo chladicího systému s konstantními otáčkami, a dodává do systému stálý tlak chladicí kapaliny. Ten ovšem nemusí vyhovovat u všech používaných nástrojů a aplikací. V systému je zařazen regulační ventil, na kterém se nastaví požadovaný tlak kapaliny. Při provozu stroje se poté přes ventil přebytečná kapalina bez užitku odpouští a na nástroj se dostává jen chtěný tlak kapaliny. Systémy často dodávají tlak i při výměně nástroje, běží tedy naprázdno a veškerá kapalina jen protéká strojem [7, 8].

Například nejběžnější systémy pracují s čerpadly, které dodávají do systému 30 l/min a tlak 7 MPa. Při vrtání vrtákem o průměru 8 mm je třeba průtoků 12 l/min. Přes regulační ventil tedy proteče bez užitku 18 litrů kapaliny. Filtry musí ovšem přefiltrovat celých 30 litrů, i když více jak polovina kapaliny vůbec nepřišla do místa řezu. To se přirozeně

negativně projevuje na životnosti filtrů. Nepoužitá kapalina se navíc dostává do kontaktu s kapalinou použitou, zbytečně se od ní ohřívá a ztrácí tak na životnosti [8].

Proměnlivé nastavení tlaku kapaliny

U proměnlivého nastavení průtoku je chladicí zařízení konstruováno tak, aby podle velikosti nástroje dodávalo potřebný průtok kapaliny. Zařízení si tedy odebere ze zásobníku potřebné množství kapaliny a zbytečně nestlačuje větší množství kapaliny, než je třeba [7].

Obě varianty průtoku mají své klady a zápory, jejich porovnání je v tab. 3.

Tab. 3 Výhody a nevýhody nastavení tlaků [7].

Stálé nastavení tlaku kapaliny	Proměnlivé nastavení tlaku kapaliny
Výhody	Výhody
<ul style="list-style-type: none"> • nižší náklady • snadná instalace • snadné odstraňování problémů 	<ul style="list-style-type: none"> • čerpadlo přivádí do systému pouze požadované množství kapaliny • je udržován optimální tlak • redukuje se ohřev chladicího média • snadno lze přeprogramovat pro zvolené tlaky
Nevýhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • fixní průtok může být v dané situaci buď příliš malý, nebo velký • plýtvání elektrickou energií • odklonění chladicího média může způsobit vznik dalšího tepla 	<ul style="list-style-type: none"> • vyšší pořizovací náklady • nutné vyškolení obsluhy a znalost programování • náročnější opravy a údržba

Instalace chladicí jednotky a její následné programování může firmy odrazovat od pořízení zařízení s proměnlivým nastavením tlaku kapaliny. K usnadnění práce na takové jednotce vyvinula americká společnost ChipBLASTER systém pro automatické nastavení průtoku kapaliny. Obsluha stroje nemusí programovat velikost průtoku, v systému nejsou regulační ventily a kapaliny se využívá velice efektivně. Systém se nazývá APO (Automatic Variable Volume) a firma ChipBLASTER ho má patentově chráněn. Navíc je prokázáno, že dokáže prodloužit životnost filtrů až o dvojnásobek v důsledku menšího objemu kapaliny, který je nutno filtrovat a šetrně zachází i s čerpadlem stroje, jehož cena není malá [7].

3.3 Použití vysokotlakého chlazení u obráběcích operací

Soustružení

U konvenčního chlazení probíhá nastavování směru a množství příchozí kapaliny většinou ručně, navíc je třeba po výměně nástroje nastavení většinou seřídít. Účinky chladicí kapaliny, tak nejsou zcela zajištěny. Při použití vysokotlakého chlazení se kapalina dostává do místa řezu pomocí kanálků v nástrojovém držáku, nebo pomocí systému hadiček. V průběhu obrábění, nebo při výměně nástrojů, není třeba do systému nijak zasahovat a celá výroba se dá automatizovat. Především u nástrojů ze slinutých karbidů, které se při

soustružení hojně využívají (viz obr. 10), je dostatečný přívod kapaliny důležitý. Při soustružení ocelí s nízkým obsahem uhlíku se kromě výhod vysokotlakého chlazení spojených s trvanlivostí nástroje využívá i efektu lepšího lámání třísek. Nízkouhlíkaté oceli, tvoří dlouhé a souvislé třísky, které komplikují výrobu, třísky se mohou namotávat na vřeteno a na nástroj a být tak nebezpečné pro obsluhu, dále mohou snadno poškodit nástroj či obrobek. Špatně se odstraňují a skladují, musí se většinou odstraňovat ručně, což znemožňuje automatizování výrobního procesu [12].



Obr. 10 Použití vysokotlakého chlazení u soustružnického nože [13].

Frézování

U frézování je značné zvýšení teploty na řezné hraně nástroje při záběru zubu. Následné ochlazení nástroje kapalinou po vyjetí ze záběru způsobí na zubu tepelný šok, který nepřispívá k dlouhé životnosti nástroje, proto mnoho výrobců doporučuje provádět frézovací operace bez chlazení. Například při čelním frézování, kdy jsou otáčky nastavené na $1\,000\text{ min}^{-1}$, dostane každý zub na nástroji 1 000 teplených šoků během jedné minuty. Doporučení výrobců frézovat bez chladicí kapaliny je založeno na předpokladu, že teplené šoky jsou pro nástroj daleko více nebezpečné, než zahřívání nástroje či odletování třísek [12].

Konvenční způsob chlazení nedostane k místu řezu dostatek kapaliny a teplota řezání zůstává vysoká. Použitím vysokotlakého chlazení se teplota v místě řezu snižuje, dochází k lepšímu mazání a snadno se odplavují třísky bez poškození nástroje či obrobku. Lze frézovat větší řeznou rychlostí, využít větších posuvů a zároveň zvednou trvanlivost nástroje [12]. Jeden ze způsobů přívodu kapaliny je zachycen na obr. 11.



Obr. 11 Frézovací nástroj s tryskami pro vysokotlaké chlazení [14].

Vrtání

Vysokotlaké chlazení je pro vrtání mimořádně přínosné, vrtání probíhá často v omezeném prostoru (slepé díry) a chlazení takovéto operace je velmi problematické. Nejčastější problémy u vrtání jsou problémy s třískami a teplotou vrtání. Při chlazení kapalina zaplňuje celou díru a brání třískám v odchodu, teplota řezu potom přivádí kapalinu k varu a odpařuje ji. Vysokotlaké chlazení tyto problémy nemá, bezpečně vyplavuje třísky a tlak zajistí proražení parní bariéry a chlazení místa řezu. Pro přívod kapaliny se používají drážky ve šroubovici nástroje [12].

3.4 Čištění chladicí kapaliny

Filtrace

Kapalinu, která projde přes trysku do místa řezu a padá do sběrné nádrže je třeba před dalším použitím přefiltrovat a zbavit ji tak jemných třísek. Filtr je zařízení obsahující vložku z porézního materiálu, přes kterou prochází kapalina a nečistoty na ni zůstávají. Dá se říct, že čím jemnější vložka, tím více nečistot odstraní, ale tím častěji se musí vyměňovat. Kapalina používaná pro vysokotlaké chlazení by neměla obsahovat částice větší jak 20 μm , ideálně by filtr měl zachytit částice větší jak 5 μm . Větší částice v kapalině působí jako abrazivum, obzvláště v kombinaci s tlakem kapaliny. Celý proces obrábění se stává méně rozměrově přesným, protože do kontaktu s abrazivní tlakovou kapalinou přichází jak nástroj, tak i obrobek. V horším případě jsou známky poškození vidět pouhým okem na samotném obrobku [15, 16].

V domnělé snaze ušetřit peníze, se v praxi používají nevhodné filtrační membrány. Ty nezachycují nečistoty a propouští je – porézní materiál vložky filtru má větší propustnost než minimálně požadovaných 20 μm . Filtr má opravdu v tomto případě větší životnost, ale dopady na stroj a na proces obrábění jsou ve srovnání s cenou filtru nezanedbatelné. Důvodem pro takovéto šetření dnes již není ani zastavování stroje pro výměnu filtru, moderní zařízení pracují se dvěma filtry zároveň. Když se životnost jednoho z nich vyčerpá, stroj přepne na druhý filtr a dá obsluze signál, že je třeba vyměnit první filtr. Výměna filtru může probíhat i za chodu stroje. Daleko účinnější řešení na zvýšení

životnosti filtru je investice do proměnlivého průtoku kapaliny, kde je do místa řezu přivedeno přesné množství kapaliny a přes filtr tak zbytečně neprotéká nic navíc. Použití správné filtrační vložky je navíc velmi často obsaženo i v záručních podmínkách výrobců strojů pro vysokotlaké chlazení [15].

U filtrů se kromě velikosti porézních děr zjišťují údaje o účinnosti filtrace a filtrační koeficient.

Filtrační koeficient

$$\beta_x = \frac{N_x}{M_x} [-] \quad (3.1)$$

Kde N_x je počet částic před filtrem, M_x je počet částic za filtrem a x je velikost sledovaných částic v μm .

Účinnost filtrace

$$\eta_x = 100 - \frac{100}{\beta_x} [\%] \quad (3.2)$$

Největší vliv na účinnost filtru mají materiály a uspořádání filtrační vložky, filtry pracují s účinností okolo 99 %. Dalším hodnoticím parametrem je jímavost filtru, neboli hmotnost zachycených nečistot vztažená na průtok filtru [16].

Magnetická separace třísek

Magnetická separace bývá ve filtračním systému předřazena filtrům. Umožňuje zachytávat třísky od velikosti 0,07 mm. Používá k tomu silné permanentní magnety ve tvaru lamel, mezi kterými protéká kapalina, a třísky ulpívají na lamelách. Na lamelách se zachytávají i paramagnetické materiály jako je měď, mosaz či bronz a to díky adhezi. Magnetická separace šetří filtry a nezpomaluje průtok kapaliny filtrem – velké množství nečistot je zachyceno již při separaci a do filtru vůbec nedorazí. Systém má velkou jímavost, například separátor o hmotnosti 1,1 kg zachytí až 190 g nečistot. Nečistoty se z lamel odstraňují tlakovou vodou. S výhodou se magnetické separace využívá u broušení nebo jemného obrábění – u malé velikosti třísek [16].

Odsávání par

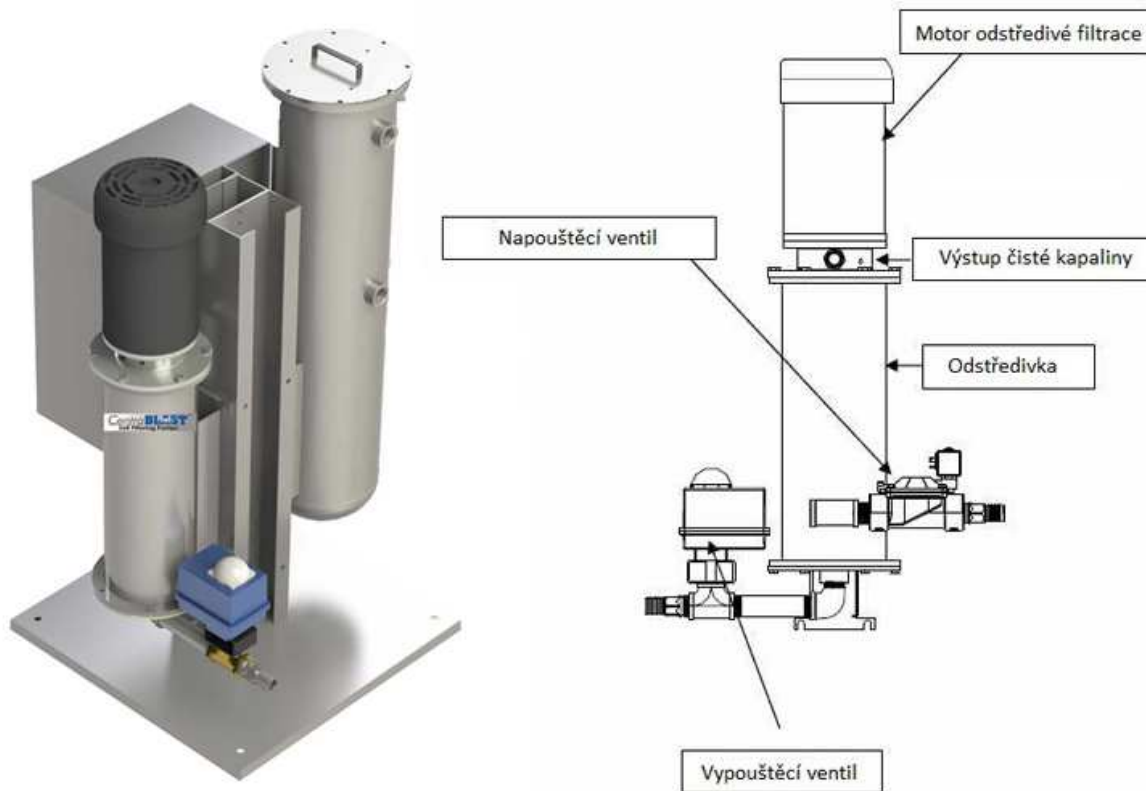
Odsávání par vzniklých při obrábění je z hlediska ekologičnosti a ochrany obsluhy důležité. Při zavření dveří pracovního prostoru a spuštění obrábění se v pracovním prostoru vytvoří mírný podtlak, který odsává vznikající páry pryč do ventilace. Po ukončení pracovního cyklu, zůstanou dveře ještě krátký moment blokovány, dokud se z pracovního prostoru neodsají páry. Po otevření dveří tedy nehrozí obsluze stroje vdechnutí par [15].

Odstředivá filtrace

Filtrace odstřediváním je založena na principu odstředivky, kdy těžší prvky jsou odstředivou silou vytěšňovány od osy otáčení odstředivky. Základem zřízení je velkokapacitní odstředivá nádrž, která filtruje jak stlačenou kapalinu, tak kapalinu nestlačenou (viz obr.12). Nežádoucí částice jsou shromážděny pod zárázkou na dně odstředivky. Vyčištěná kapalina poté odchází do nádrže k dalšímu použití. Nežádoucí částice se dostanou do sedimentační nádoby, nebo do odstředivky kalu, kde se kal ještě

jednou odstředí a vrací do systému. Účinnost tohoto zařízení je větší než u sedimentačních zařízení, pohybuje se kolem 98 % u částic s velikostí 2 μm [15].

Centra **BLAST**



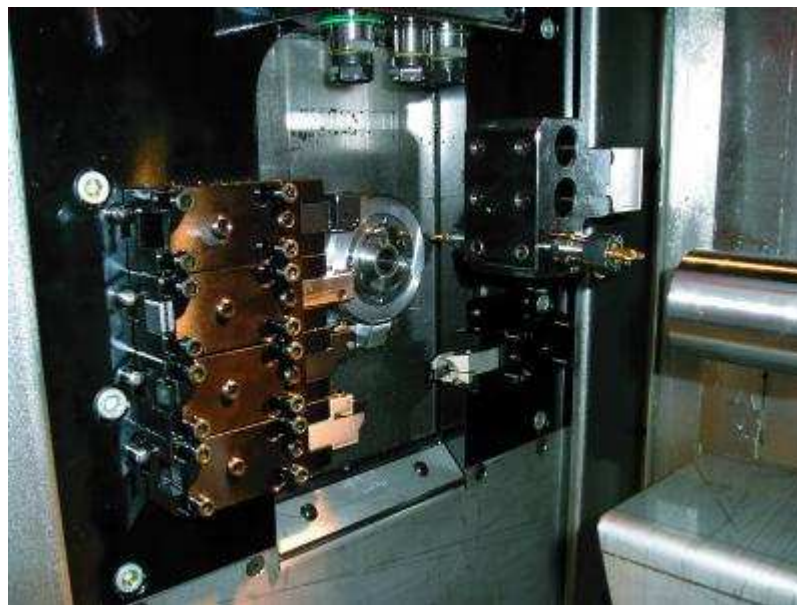
Obr. 12 Odstředivá filtrační jednotka firmy Chipblaster [15].

4 DLOUHOTOČNÉ AUTOMATY

Dlouhotočné automaty se také nazývají soustruhy švýcarského typu, nebo soustruhy s posuvným vřeteníkem. Používají se pro soustružení dlouhých hřídelí malého průměru. Běžné soustruhy mohou obrábět hřídele do délky třinásobku obráběného průměru. Od větších je nutno použít podpěrný systém, ale toto řešení výrobu prodlužuje a tím i zdražuje, navíc řešení není technologicky ideální. Oproti tomu dlouhotoče dokáží obrobit hřídel z celé tyče, jejíž délka není limitována [5].

U dlouhotoče, stejně jako u klasického soustruhu, je možno nalézt vřeteník, vřeteno, upínač a kleštinu. U dlouhotočných automatů se ale celý vřeteník pohybuje v ose obrábění. Dlouhotoče mají límec, který odděluje vřeteno od pracovního prostoru stroje. Polotovar pro obrábění je umístěn v mechanickém vodícím pouzdře, které se sevře kolem polotovaru, tvoří tak těsnou lunetu a zároveň i upínač. Jestliže není polotovar z kruhového průřezu, ale například ze čtyřhranu či šestihranu, tak se místo mechanického vodícího pouzdra používají pouzdra pneumatická, pouzdro se tedy snadno přizpůsobí průměru či tvaru polotovaru [5].

Nástrojový suport je umístěn na límci kolem vodícího pouzdra (viz obr. 13). Na jednom automatu může být přitom umístěno i několik na sobě nezávislých suportů. Výhodou automatu je konstantní vzdálenost špičky nástroje od čela vodícího pouzdra, nástroj tak obrábí neustále u místa upnutí. Toho lze s výhodou využít v nastavení parametrů obrábění, především lze nastavit větší hodnotu a_p přičemž neklesá kvalita obrobené plochy. Automaty dokáží obrábět s přesností 0,01 mm a dostávat se až na $R_a 0,4 \mu\text{m}$ a to na jeden úběr třísky, klasické revolverové soustruhy dosahují této přesnosti při použití postupného soustružení [5].



Obr. 13 Pracovní prostor dlouhotočného automatu [5].

Dlouhotočné automaty mají oproti klasickým revolverovým soustruhům lépe vyřešené přepínání mezi nástroji. Nástroj se u automatů mění pouhým posunutím suportu, zatímco nástrojová hlava revolverového soustruhu musí odjet z místa řezu do bezpečné vzdálenosti, tam přepnout na chtěný nástroj a potom se vrátit do procesu, to stojí drahocenné vteřiny, které jsou znát především v hromadné výrobě [5].

Automaty se z výhodou používají i pro obrábění z krátkých polotovarů, kdy je možné do kleštiny za sebe upnout několik kusů a obrábět je poté najednou, bez zastavování na výměnu kusu a bez brzdění a opětovného nabíhání otáček [5].

Dlouhotočné automaty mají dnes plnou výbavu moderních strojů, jako jsou dvě vřetena, C osy, poháněné nástroje a automatické podavače tyčí s vlastním odměřováním a zásobníkem. Vše je uspořádáno tak, aby stroj dokázal obrobit dílec kompletně na hotovo z obou stran, včetně příčného, podélného nebo úhlového vrtání, frézování, válečkování, popř. odvalování a podobných technologií. Volba nástrojového vybavení není ničím omezena a stroj lze osadit jak klasickými ISO nástroji, tak speciálními tvarovými či postupovými nástroji. Přitom stále splňují požadavek, aby se chovaly jako automaty a nevyžadovaly stálou přítomnost obsluhy stroje. Samozřejmostí je i schopnost stroje předávat dílec do druhého vřetene za plných otáček, a to jak materiál kulatý, tak čtyřhran nebo šestihran [5].



Obr. 14 Automatický soustruh XD35N [6].

5 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY S POUŽITÍM VYSOKOTLAKÉHO CHLAZENÍ

Experimentální zkoušky byly provedeny ve firmě, která si nepřeje být zmiňována, pro potřeby diplomové práce je označena firmou Alfa. Firma Alfa se věnuje soustružení ocelí na dlouhotočných automatech, kterých vlastní celkem 15 (všechny s podporou CNC) a zvažuje, že na svoje stroje nakoupí systém vysokotlakého chlazení. Cílem experimentu je zjistit jestli jsou přínosy chladicího systému natolik velké, že se vyplatí nákup chladicích jednotek zahrnout do investic firmy.

Firma Alfa v současné době vlastní 3 soupravy na vysokotlaké chlazení, experiment probíhal na jedné z nich.

5.1 Předmět experimentu

Předmětem experimentu je sledování změn na válcové ploše obrobku vzhledem k nastavení vysokotlakého chlazení.

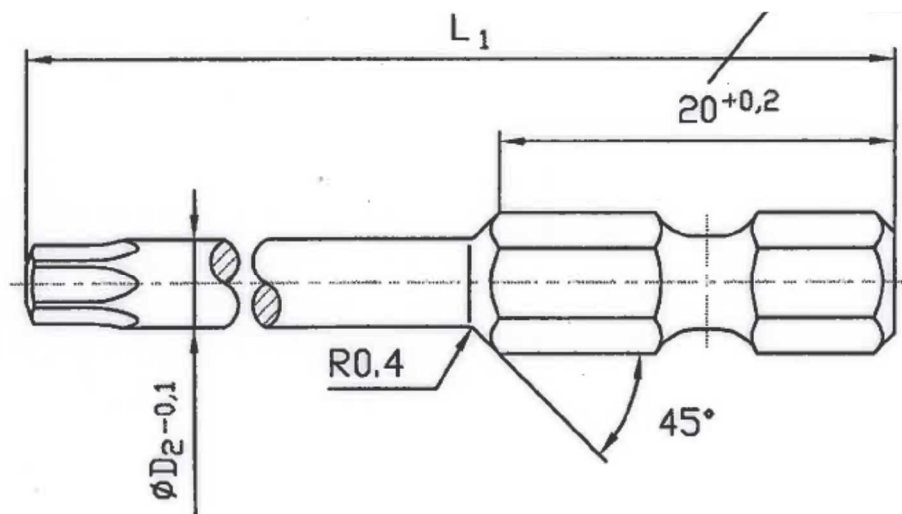
Soustružená část je vnější válcová plocha o délce 89 mm.

Soustružený průměr je 3 mm; 4,5 mm a 6 mm, od každého průměru je soustruženo 9 000 ks. Jedná se o nejběžnější výrobky firmy Alfa, ročně jich vyrábí v nákladech milionů kusů. Náhled na obrobek je na obrázku 15. Z obrázku 15 je jasné, že se na obrobku provádějí i jiné operace, ty se pro potřeby experimentu nesledují.

Vždy po 1000 kusech a po změně tlaku chladicí kapaliny se odeberou vzorky obrobků a třísek pro další vyhodnocení. Po 3 000 ks se změní velikost tlaku chladicí kapaliny. Počáteční tlak je 10 MPa, poté se snižuje na 5 MPa a nakonec se vysokotlaké chlazení vypne a chladí se pouze konvenčně. Celkem tedy v rámci experimente vznikne 27 000 ks obrobků a odebere se více jak 135 vzorků.

U obráběcího procesu se hodnotí jakost povrchu obrobku (R_a a R_z), tvrdost materiálu po obrábění, trvanlivost nástrojů, počet otlaků na obrobkách – poškození od třísek a tvar třísek.

Po získání dat se udělá propočtení ekonomického dopadu chlazení a vyhodnotí se závěry formou podkladů a doporučení pro rozhodování o investicích do vysokotlakého chlazení.



Obr. 15 Obráběná součást.

5.2 Vstupní parametry experimentu

5.2.1 Stroj

Dlouhotočný obráběcí automat od firmy Star CNC Machine Tool Corp. S označením. Veškeré specifikace ke stroji STAR SW-20 jsou uvedeny v příloze číslo 1.

5.2.2 Zařízení na vysokotlaké chlazení

SFB-301 eco od firmy Buchele SF – systeme. Jedná se o zařízení na tvorbu vysokotlakého chlazení, vyobrazení jednotky je na obr. 16.

Parametry zařízení jsou uvedeny v následující tab. 4:

Tab. 4 parametry stroje SFB-301 eco [17].

Tlak a objem	Filtrace	Velikost nádrže	Velikost [mm]
150 bar, 20 l/min	40 μ m	200 l	1590 x 710 x 800

Další informace o SFB-301 eco jsou uvedeny v příloze číslo 2.



Obr. 16 SFB-301 eco [17].

5.2.3 Řezná kapalina

Ilocut 522 MP od výrobce Castrol. Jedná se o vysoce rafinovaný minerální olej obsahující přísady proti otěru. Více informací o oleji je v příloze číslo 3.

5.2.4 Materiál

Firma Alfa není českou firmou, jedná se o výrobní závod, vyrábějící primárně pro svoji mateřskou společnost, která se stará o vývoj a prodej produktů. Vstupní materiál na obrábění mají předepsaný od mateřské firmy.

Polotovarem pro obrábění je tyčový šestihranný materiál o délce 3 m a velikosti ¼ palce, tedy o rozměrech 6,35 mm a 7,18 mm. Materiálem polotovaru je nástrojová ocel (přesné označení materiálu si firma nepřeje zveřejnit). Chemické složení materiálu je v tab 5.

Tab. 5 Chemické složení materiálu, hodnoty jsou ve váhových procentech.

C	Si	Mn	P	S	Cr	V
0,57 – 0,65	0,70 – 1,00	0,60 až 0,90	max. 0,035	max. 0,035	1,00 – 1,30	0,07 – 0,12

Pro experiment byla vzata nová bedna materiálu, kde všechny tyče pocházely ze stejné tavby. Materiál byl použit na všechny zkoušky. Tímto krokem byl z experimentu vyloučen případný vliv různých taveb materiálu.

5.2.5 Obrobek

Na obrobku se sleduje podélné vnější soustružení válcové plochy, viz odstavec předmět experimentu na začátku kapitoly 5. Na obrobku se provádí i další obráběcí operace, jako soustružení zápichu, či upíchnutí, pro experiment jsou nedůležité a nevěnuje se jim pozornost.

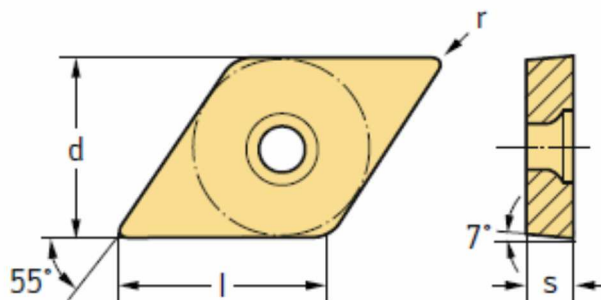
Řezné podmínky jsou uvedeny samostatně u každého soustruženého průměru.

Nutno dodat, že obrobek jde po obráběcí operaci na mytí a na povrchovou úpravu (pískování) a na teplené zpracování (kalení a popouštění).

5.2.6 Nástroje

Při zkouškách se využilo celkem čtyř nástrojů. Informace o nástrojích jsou zachyceny v tab. 6 až 9 a na obr. 17 až 20.

VBD od firmy Walter s označením: DCGT 11T304-PF2

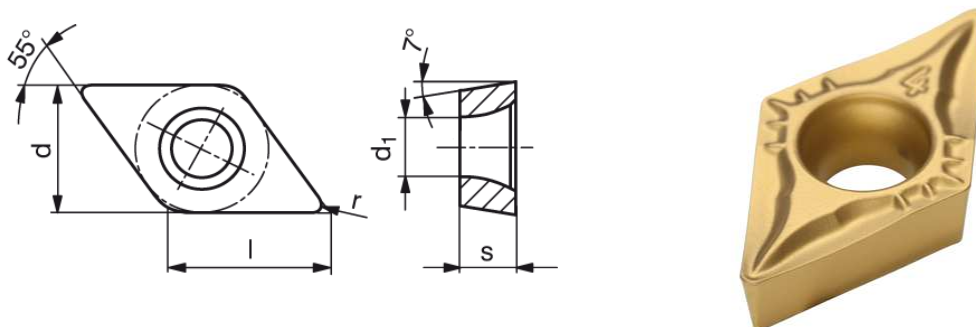


Obr. 17 VBD DCGT 11T304-PF2 [19].

Tab. 6 VBD DCGT 11T304-PF2 [19].

d [mm]	l [mm]	s [mm]	r [mm]	f [mm]	a _p [mm]
9,525	11,63	3,97	0,40	0,08 – 0,25	0,20 – 2,50

VBD od firmy WNT s označením: DCMT 11T304EN-P43 CWN2135, pro potřeby práce je označena WTN1.

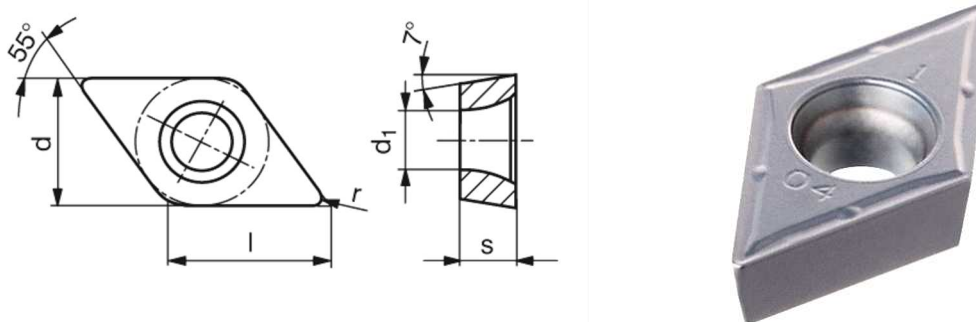


Obr. 18 VBD DCMT 11T304EN-P43 CWN2135 [18].

Tab. 7 VBD DCMT 11T304EN-P43 CWN2135 [18].

d [mm]	l [mm]	s [mm]	r [mm]	d ₁ [mm]
9,525	11,60	3,97	0,40	4,40

VBD od firmy WNT s označením: DCMT 11T304EN-PF26 HCN2125, pro potřeby práce je označena WTN2.

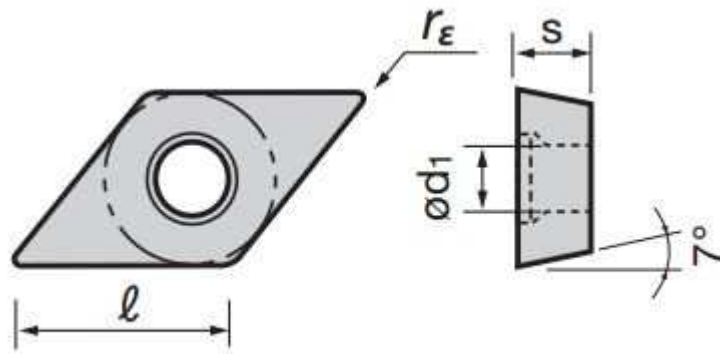


Obr. 19 VBD DCMT 11T304EN-PF26 HCN2125 [18].

Tab. 8 VBD DCMT 11T304EN-PF26 HCN2125 [18].

d [mm]	l [mm]	s [mm]	r [mm]	d ₁ [mm]
9,525	11,60	3,97	0,40	4,40

VBD od firmy TUNGALOY s označením: DCMT 11T304EN-PF2 WSM20



Obr. 20 VBD DCMT 11T304EN-PF2 WSM20 [20].

Tab. 9 VBD DCMT 11T304EN-PF26 HCN2125 [20].

d [mm]	l [mm]	s [mm]	r [mm]	d ₁ [mm]
9,525	11,60	3,97	0,40	4,40

5.3 Měřicí přístroje a metody měření

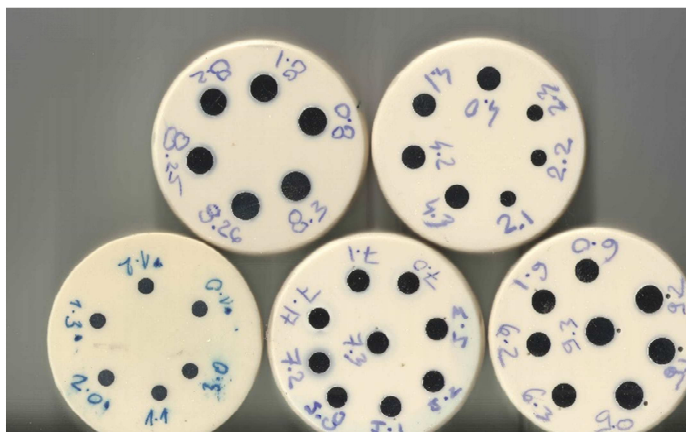
K měření experimentu byly použity následující přístroje a metody. Všechny použité přístroje má firma Alfa řádně kalibrované a pravidelně kontrolované.

Jakost povrchu

Pro měření jakosti povrchu byl použit drsnoměr Surftest JS-310 od společnosti Mitutoyo. Předepsaná jakost povrchu je $R_z = \max. 16 \mu\text{m}$, na její důsledné dodržování se příliš nedbá, obrobek jde ještě na pískování a požadovaná drsnost je požadována až po této operaci. Povrch nesmí být po soustružení příliš hrubý, aby se následná operace pískování dobře uchytila. Kontrolu provádí pracovník kvality a v případě nutnosti zastaví výrobu.

Tvrдость materiálu po obrábění

Firmu zajímalo, jaký vliv má vysokotlaké chlazení na tvrdost materiálu, měření probíhalo na přístroji Micro-Vickers HM-210/200 od firmy Mitutoyo. Tvrđost polotovaru je 25 HRC. Sledovalo se především, jestli směrem do středu obrobku nedochází ke změnám v tvrdosti. Do materiálu po obrábění se od povrchu obroku provedlo 15 měření směrem ke středu obrobku až do hloubky 1,43 mm. Vzorke pro měření na tvrdoměru je možno vidět na obr. 21.



Obr. 21 Vzorčky pro měření na tvrdoměru.

Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje je stanovena počtem obrobených kusů. Trvanlivost hlídá obsluha stroje, která pravidelně odebrává obrobené kusy pro kontrolu. Pokud je povrch obrobku viditelně nevyhovující, nebo jestliže dochází k tvorbě nevhodné třísky či obrobek rozměrově nevyhovuje a není možné opravu provést pomocí korekcí nástroje, dochází k zastavení stroje a výměně nástroje. Počet obrobených kusů tedy stanovuje obsluha stroje.

Hodnocení třísek

U třísek se hodnotí především, jestli poškozují obrobek, tedy počet kusů, které jsou znehodnocené otlaky od třísek. Každých 3 000 kusů (od jednoho průměru a jednoho tlaku) jsou ručně přebrány a kusy s otlaky vyřazeny jako odpad. Dále se hodnotí tvar a velikost třísek, vzhledem k malým úběrům, nemá firma problém s uskladněním a likvidací třísek, jde především o to, jestli třísky svým tvarem nekomplikují svůj odchod z pracovního prostoru stroje.

6 PRŮBĚH EXPERIMENTŮ

V této kapitole jsou postupně zachyceny průběhy a výsledky experimentů u všech soustružených průměrů a u všech použitých tlaků.

6.1 Soustružení průměru 3 mm

6.1.1 Řezné podmínky

Řezné podmínky jsou pro celý průběh experimentu a především pro všechny tlaky stejné:

- otáčky: 6000 min^{-1} ,
- posuv: 0,23 mm,
- použité nástroje: VBD Walter a VBD WTN2,
 - Oba nástroje jsou v záběru současně, hrubovací nástroj je předsazen před nástroj dokončovací. Dokončovací nástroj je za osou otáčení převrácen kolem své osy o 180° .
- a_p hrubovací destičky 0,775 mm, a_p dokončovací destičky 0,9 mm.

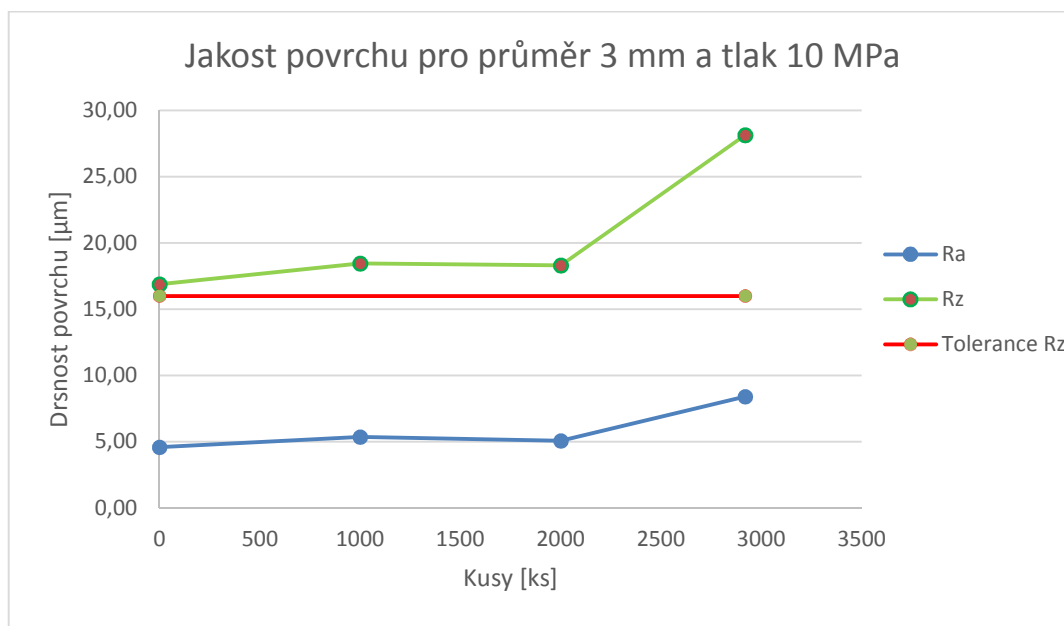
6.1.2 Výsledky pro tlak 10 MPa

Jakost povrchu

Pro operaci obrábění je předepsaná jakost povrchu $R_z = \text{max. } 16 \mu\text{m}$, její dodržení se příliš nesleduje, protože obrobek čeká ještě povrchová úprava. Výsledky jsou zachyceny v tab. 10 a na obr. 22.

Tab. 10 Jakost povrchu pro průměr 3 mm a tlak 10 MPa.

Odběr [ks]	0	1 000	2 000	3 000
Ra [μm]	4,59	5,35	5,07	8,41
Rz [μm]	16,88	18,45	18,32	28,14



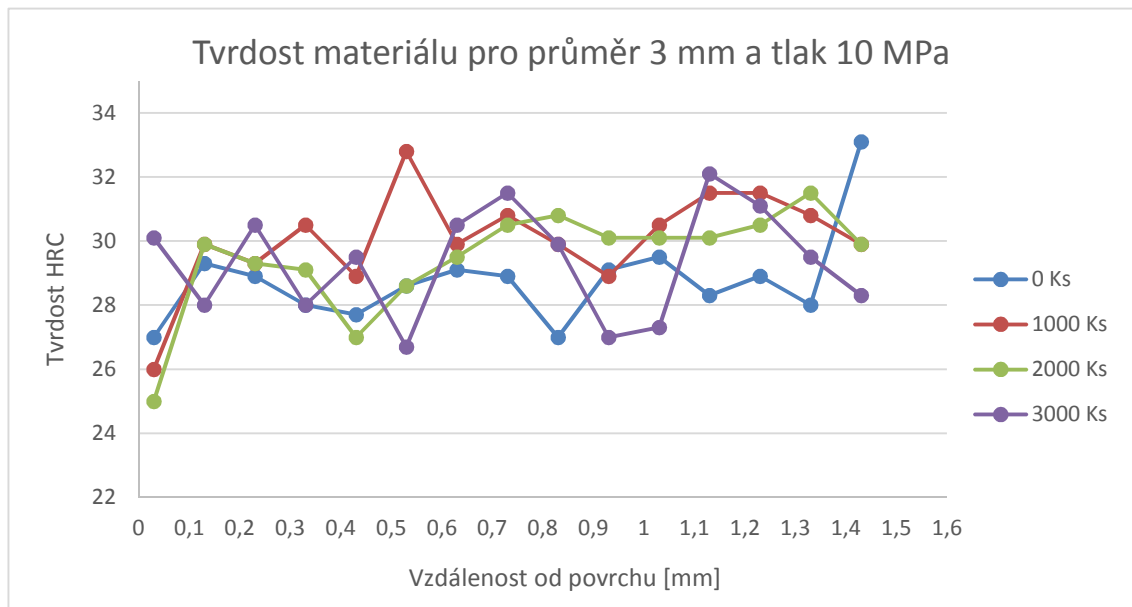
Obr. 22 Grafická závislost jakosti povrchu pro průměr 3 mm a tlak 10 MPa.

Tvrdość materiálu po obrábění

Výsledky jsou zachyceny v tab. 11 a na obr. 23. Ukazují, že dochází ke zvýšení tvrdosti materiálu, ale v celém průřezu. Pro následující operaci kalení, tento stav nedělá problém.

Tab. 11 Tvrdość materiálu po obrábění pro průměr 3 mm a tlak 10 MPa.

Vzdálenost o povrchu [mm]	0,03	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53	0,63	0,73	0,83	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,43
Odběr [ks]	Tvrdość HRC														
0	27,0	29,3	28,9	28,0	27,7	28,6	29,1	28,9	27,0	29,1	29,5	28,3	28,9	28,0	33,1
1 000	26,0	29,9	29,3	30,5	28,9	32,8	29,9	30,8	29,9	28,9	30,5	31,5	31,5	30,8	29,9
2 000	25,0	29,9	29,3	29,1	27,0	28,6	29,5	30,5	30,8	30,1	30,1	30,1	30,5	31,5	29,9
3 000	30,1	28,0	30,5	28,0	29,5	26,7	30,5	31,5	29,9	27,0	27,3	32,1	31,1	29,5	28,3



Obr. 23 Grafická závislost tvrdosti materiálu pro průměr 3 mm a tlak 10 MPa.

Trvanlivost nástroje

Nástroje zvládly vyrobít celou zakázku, tedy 3 000 ks. Na konci zakázky již byly natolik poškozeny, že kdyby měla zakázka pokračovat, muselo by dojít k výměně nástroje. Což dokazuje tříška i prudký nárůst Rz. Životnost při tlaku 10 MPa byla stanovena na 3 000 ks.

Hodnocení třísek

Na zakázce bylo nalezeno celkem 10 kusů s otlaky. Tříška na obr. 24 dokazuje, že nástroj byl při 3 000 kusech na konci životnosti.



Obr. 24 Třísky při tlaku 10 MPa, konec životnosti.

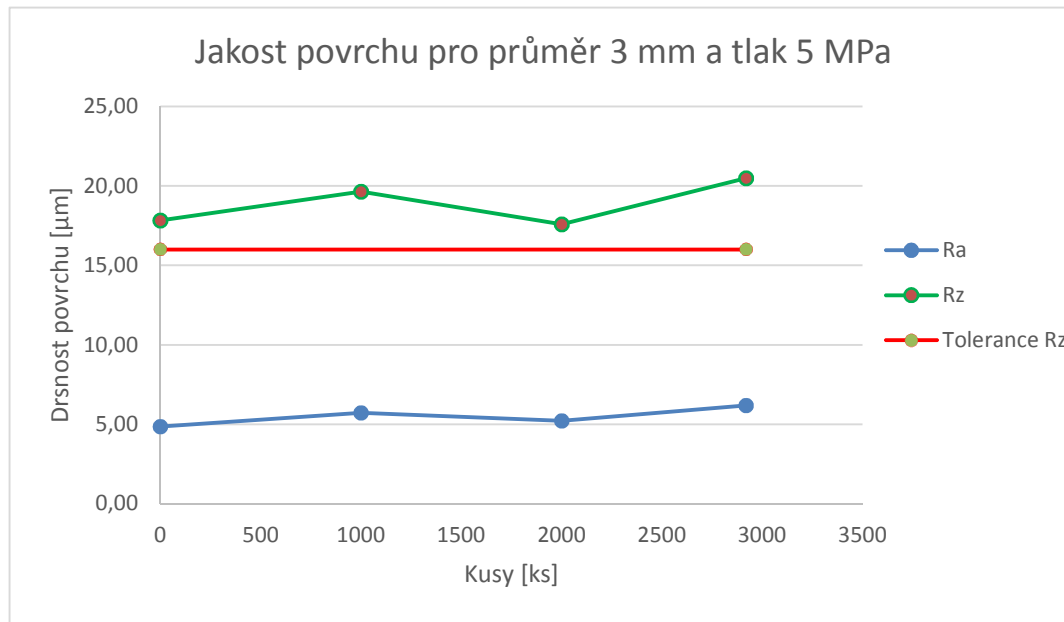
6.1.3 Výsledky pro tlak 5 MPa

Jakost povrchu

Pro operaci obrábění je předepsaná jakost povrchu $R_z = \max. 16 \mu\text{m}$, její dodržení se příliš nesleduje, protože obrobek čeká ještě povrchová úprava. Výsledky jsou zachyceny v tab. 12 a na obr. 25.

Tab. 12 jakost povrchu pro průměr 3 mm a tlak 5 MPa.

Odběr [ks]	0	1 000	2 000	2 920
Ra [μm]	4,86	5,73	5,22	6,19
Rz [μm]	17,83	19,65	17,59	20,48
Tolerance Rz [μm]	16,00	16,00	16,00	16,00



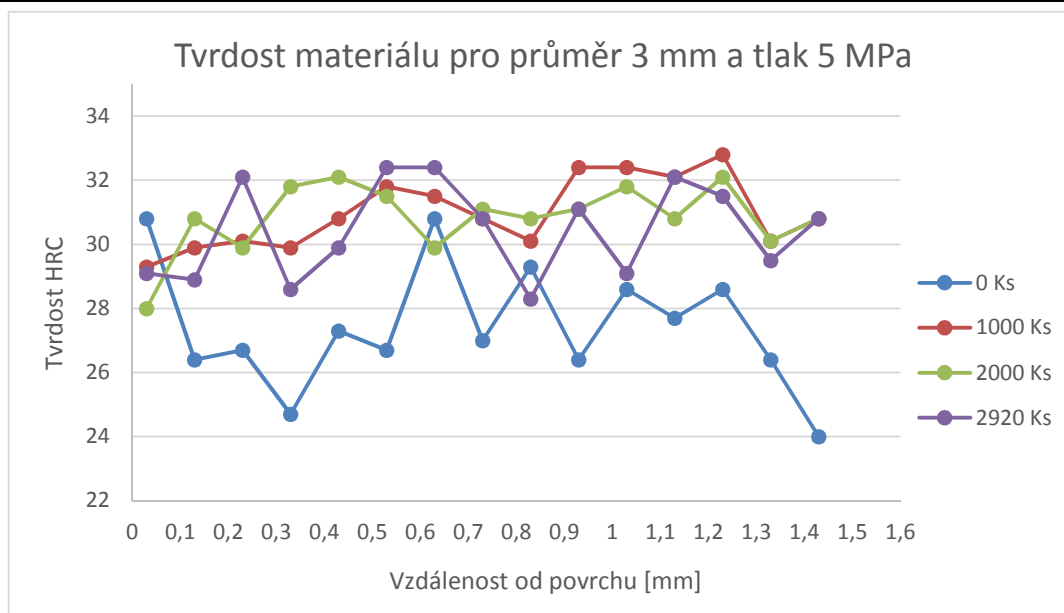
Obr. 25 Grafická závislost jakosti povrchu pro průměr 3 mm a tlak 5 MPa.

Tvrдость materiálu po obrábění

Výsledky jsou zachyceny v tab. 13 a na obr. 26. Ukazují, že dochází ke zvýšení tvrdosti materiálu, ale v celém průřezu. Pro následující operaci kalení, tento stav nedělá problém. Při startu zakázky jsou vidět hodnoty nižší, než u ostatních odběrů, hodnoty značně kolísají, ale rovněž nevykazují trend snižování drsnosti směrem ke středu obrobku.

Tab. 13 Tvrdość materiálu po obrábění pro průměr 3 mm a tlak 5 MPa.

Vzdálenost o povrchu [mm]	0,03	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53	0,63	0,73	0,83	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,43
Odběr [ks]	Tvrdość HRC														
0	30,8	26,4	26,7	24,7	27,3	26,7	30,8	27,0	29,3	26,4	28,6	27,7	28,6	26,4	24,0
1 000	29,3	29,9	30,1	29,9	30,8	31,8	31,5	30,8	30,1	32,4	32,4	32,1	32,8	30,1	30,8
2 000	28,0	30,8	29,9	31,8	32,1	31,5	29,9	31,1	30,8	31,1	31,8	30,8	32,1	30,1	30,8
3 000	29,1	28,9	32,1	28,6	29,9	32,4	32,4	30,8	28,3	31,1	29,1	32,1	31,5	29,5	30,8



Obr. 26 Grafická závislost tvrdosti materiálu pro průměr 3 mm a tlak 5 MPa.

Trvanlivost nástroje

Nástroje nezvládly vyrobit celou zakázku, po 2 920 vyrobených kusech začaly nástroje vyrábět neshodné kusy co do rozměru, tak viditelně i do jakosti povrchu. Životnost při tlaku 5 MPa byla stanovena na 2 920 ks.

Hodnocení třísek

Na zakázce s tlakem 5 MPa bylo nalezeno celkem 47 kusů s otlaky, které se musí pro další operace vyřadit a vykázat jako neshodné kusy.

6.1.4 Výsledky bez použití vysokotlakého chlazení

Při řezných podmínkách použitých pro průměr 3 mm, se výroba musela zastavit po 100 vyrobených kusech. Důvodem byly otlaky na více jak 25 % kusů. Pokračování výroby bylo tedy nemožné.

Jakost povrchu

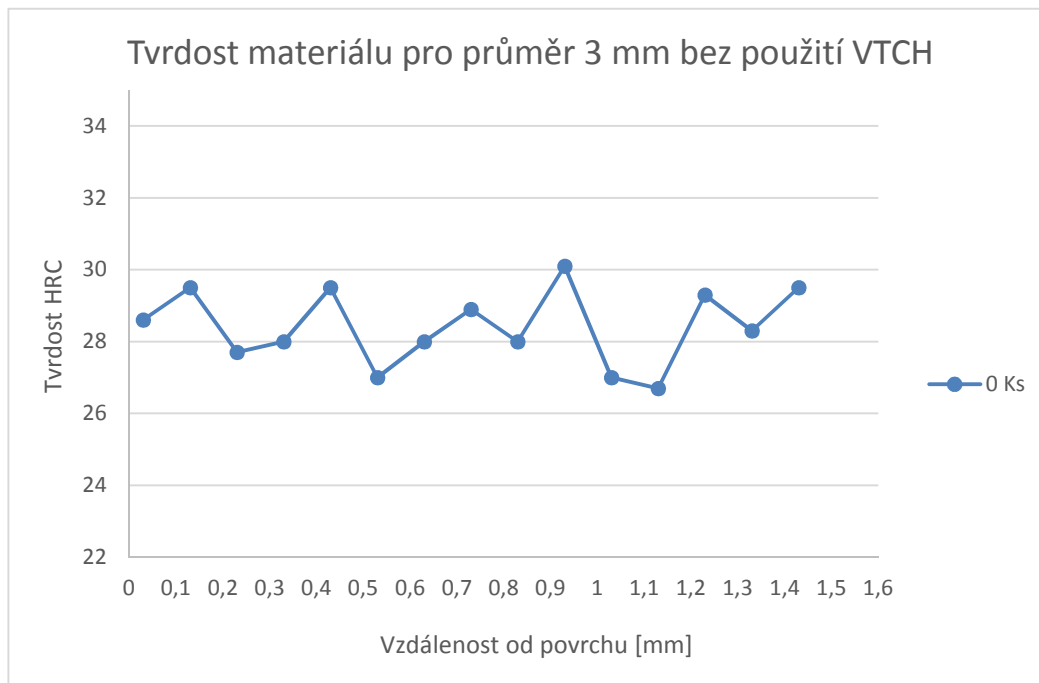
Data pro hodnocení povrchu jsou jen z prvního odběru (první vyrobené kusy). Bylo dosaženo $R_a = 4,84 \mu\text{m}$ a $R_z = 17,87 \mu\text{m}$.

Tvrdość materiálu po obrábění

Tvrdość je zjištěna rovněž jen pro první odběr, zachycena je na obr. 27 a v tab. 14.

Tab. 14 Tvrdost materiálu po obrábění pro průměr 3 mm bez použití vysokotlakého chlazení.

Vzdálenost o povrchu [mm]	0,03	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53	0,63	0,73	0,83	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,43
Odběr [ks]	Tvrdost HRC														
0	28,6	29,5	27,7	28,0	29,5	27,0	28,0	28,9	28,0	30,1	27,0	26,7	29,3	28,3	29,5



Obr. 27 Grafická závislost tvrdosti materiálu pro průměr 3 mm bez použití vysokotlakého chlazení.

Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje nebyla zjištěna, experiment byl ukončen z jiného důvodu, než z opotřebení nástroje.

Hodnocení třísek

Třísky dělaly v tomto experimentu velký problém, po obrobení 100 kusů se musela výroba zastavit z důvodu, že obrobky byly poškozeny od třísek. Celkem bylo poškozeno 25 kusů, což je při 100 kusech nevyhovující. Otlaky jsou vidět na obr. 28.



Obr. 28 Otlaky od třísek na obrobku.

6.2 Soustružení průměru 4,5 mm

6.2.1 Řezné podmínky

Řezné podmínky jsou pro celý průběh experimentu a především pro všechny tlaky stejné.

- otáčky: $6\,000\text{ min}^{-1}$,
- posuv: 0,19 mm,
- použité nástroje: VBD WTN1 a VBD WTN2,
 - Oba nástroje jsou v záběru současně, hrubovací nástroj je předsazen před nástroj dokončovací. Dokončovací nástroj je za osou otáčení převrácen kolem své osy o 180° .
- a_p hrubovací destičky 0,69 mm, a_p dokončovací destičky 0,65 mm.

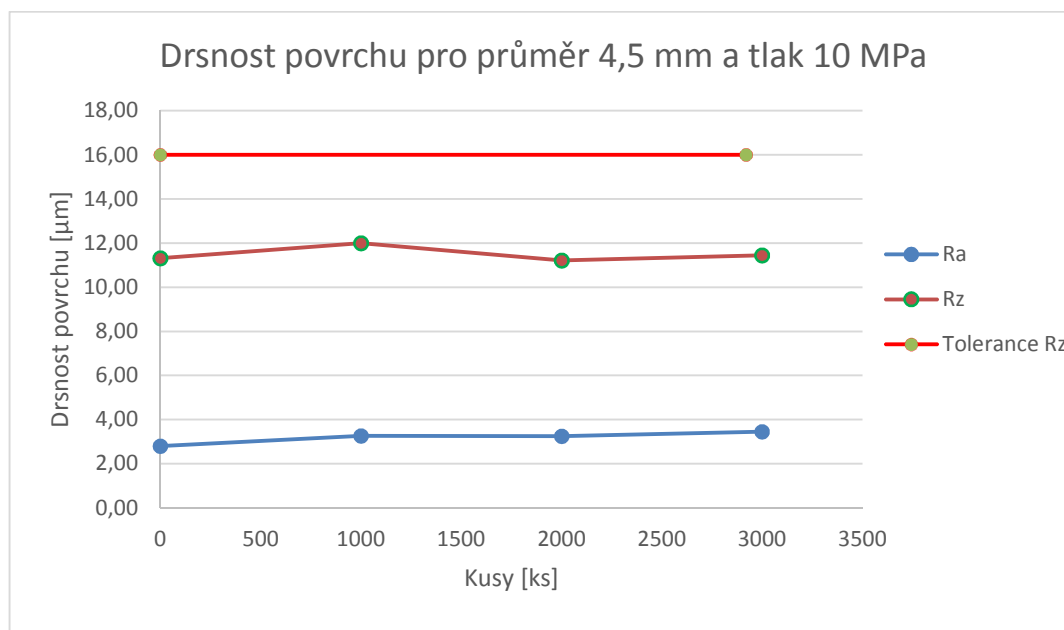
6.2.2 Výsledky pro tlak 10 MPa

Jakost povrchu

Tolerance pro drsnost povrchu je $R_z = \max. 16\ \mu\text{m}$. Naměřené hodnoty jsou v tab. 15 a na obr. 29.

Tab. 15 Drsnost povrchu pro průměr 4,5 mm a tlak 10 MPa.

Odběr [ks]	0	1 000	2 000	3 000
R_a [μm]	2,80	3,27	3,26	3,46
R_z [μm]	11,31	12,00	11,22	11,44



Obr. 29 Grafická závislost drsnosti povrchu u průměru 4,5 mm a tlaku 10 MPa.

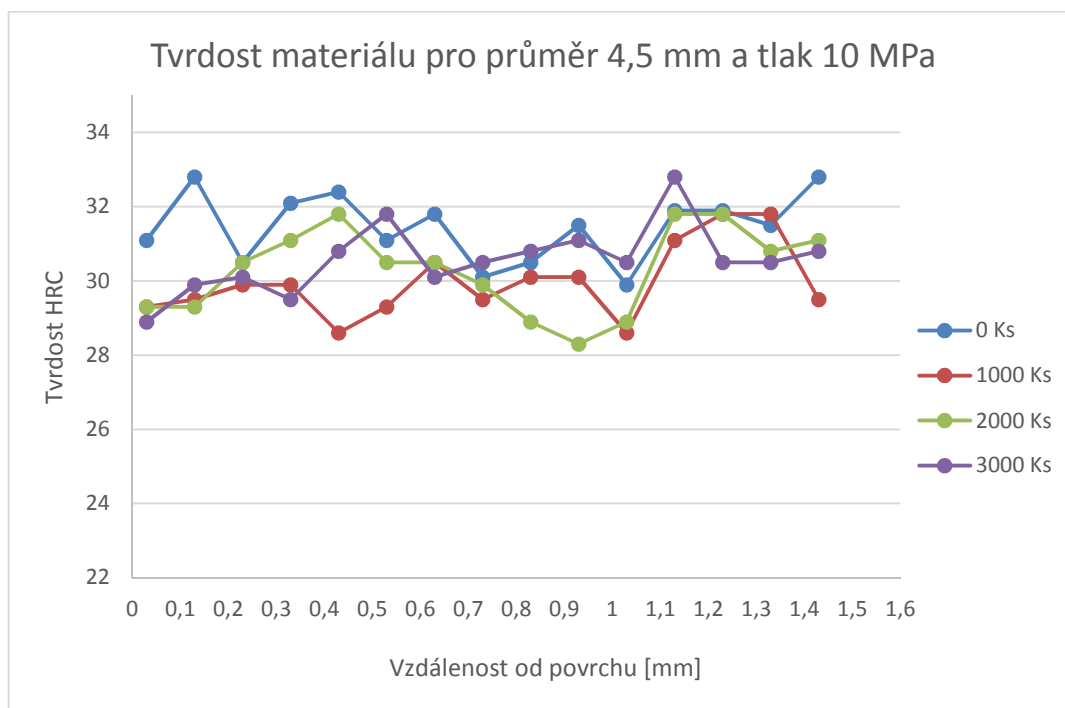
Měřením bylo zjištěno, že drsnost povrchu vyhovuje předepsané toleranci.

Tvrдость materiálu po obrábění

V tab. 16 a na obr. 30 je zachycen průběh tvrdosti v materiálu. Je vidět, že tvrdost se oproti polotovaru zvětšila, ale není zde žádný trend, že by tvrdost byla větší na povrchu a směrem do středu obrobku by se snižovala.

Tab. 16 Tvrдость materiálu po obrábění pro průměr 4,5 mm a tlak 10 MPa.

Vzdálenost o povrchu [mm]	0,03	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53	0,63	0,73	0,83	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,43
Odběr [ks]	Tvrдость HRC														
0	31,1	32,8	30,5	32,1	32,4	31,1	31,8	30,1	30,5	31,5	29,9	31,9	31,9	31,5	32,8
1 000	29,3	29,5	29,9	29,9	28,6	29,3	30,5	29,5	30,1	30,1	28,6	31,1	31,8	31,8	29,5
2 000	29,3	29,3	30,5	31,1	31,8	30,5	30,5	29,9	28,9	28,3	28,9	31,8	31,8	30,8	31,1
3 000	28,9	29,9	30,1	29,5	30,8	31,8	30,1	30,5	30,8	31,1	30,5	32,8	30,5	30,5	30,8



Obr. 30 Grafická závislost tvrdosti materiálu pro průměr 4,5 mm a tlak 10 MPa.

Trvanlivost nástroje

Nástroje při tlaku 10 MPa zvládly obrobít všech 3 000 kusů a jejich trvanlivost ještě nebyla vyčerpána. Po domluvě s firmou, bylo rozhodnuto, že se nástroje vrátí na stroj a bude zjištěno, kde končí jejich trvanlivost při použitých podmínkách. Výsledkům se věnuje kapitola 6.4.

Hodnocení třísek

Při přebrání zakázky, byl nalezen jediný kus s otlakem. Tvar třísky byl po celou dobu soustružení příznivý.

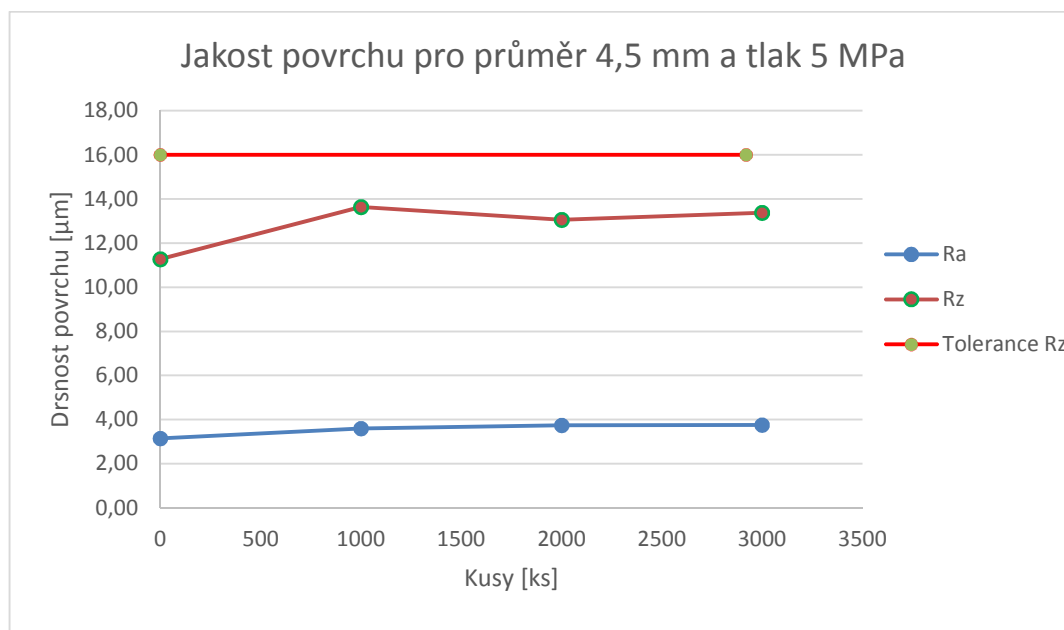
6.2.3 Výsledky pro tlak 5 MPa

Jakost povrchu

Tolerance pro drsnost povrchu je $R_z = \max. 16 \mu\text{m}$. Naměřené hodnoty jsou v tab. 17 a na obr. 31.

Tab. 17 Drsnost povrchu pro průměr 4,5 mm a tlak 5 MPa.

Odběr [ks]	0	1 000	2 000	3 000
Ra [μm]	3,14	3,60	3,74	3,75
Rz [μm]	11,27	13,63	13,05	13,37



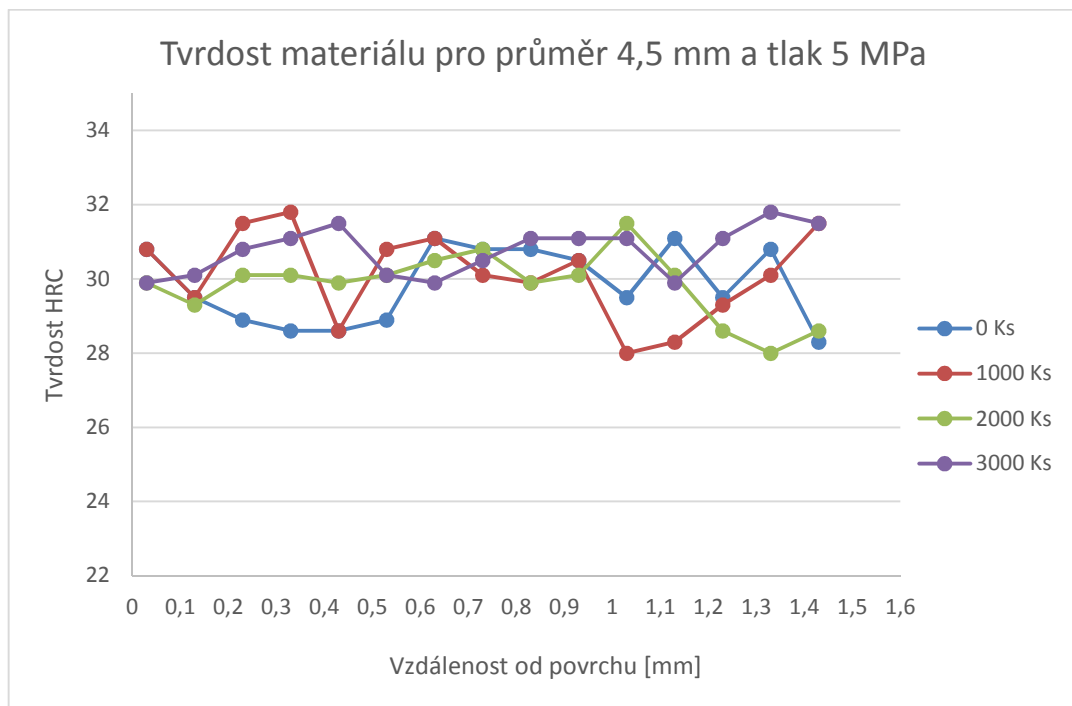
Obr. 31 Grafická závislost drsnosti povrchu u průměru 4,5 mm a tlaku 5 MPa.

Tvrdość materiálu po obrábění

V tab. 18 a na obr. 32 je zachycen průběh tvrdosti v materiálu. Je vidět, že tvrdost se oproti polotovaru rovněž zvětšila, ale není zde žádný trend, že by tvrdost byla větší na povrchu a směrem do středu obrobku by se snižovala.

Tab. 18 Tvrdość materiálu po obrábění pro průměr 4,5 mm a tlak 5 MPa.

Vzdálenost o povrchu [mm]	0,03	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53	0,63	0,73	0,83	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,43
Odběr [ks]	Tvrdość HRC														
0	30,8	29,5	28,9	28,6	28,6	28,9	31,1	30,8	30,8	30,5	29,5	31,1	29,5	30,8	28,3
1 000	30,8	29,5	31,5	31,8	28,6	30,8	31,1	30,1	29,9	30,5	28,0	28,3	29,3	30,1	31,5
2 000	29,9	29,3	30,1	30,1	29,9	30,1	30,5	30,8	29,9	30,1	31,5	30,1	28,6	28,0	28,6
3 000	29,9	30,1	30,8	31,1	31,5	30,1	29,9	30,5	31,1	31,1	31,1	29,9	31,1	31,8	31,5



Obr. 32 Grafická závislost tvrdosti materiálu pro průměr 4,5 mm a tlak 5 MPa.

Trvanlivost nástroje

Podobně jako při tlaku 10 MPa i při 5 MPa zvládly nástroje obrobít všech 3 000 kusů a jejich trvanlivost ještě nebyla vyčerpána.

Hodnocení třísek

Počet otlaků nalezených v zakázce se rovněž rovnal jedné, třísky byly co celou dobu soustružení příznivé.

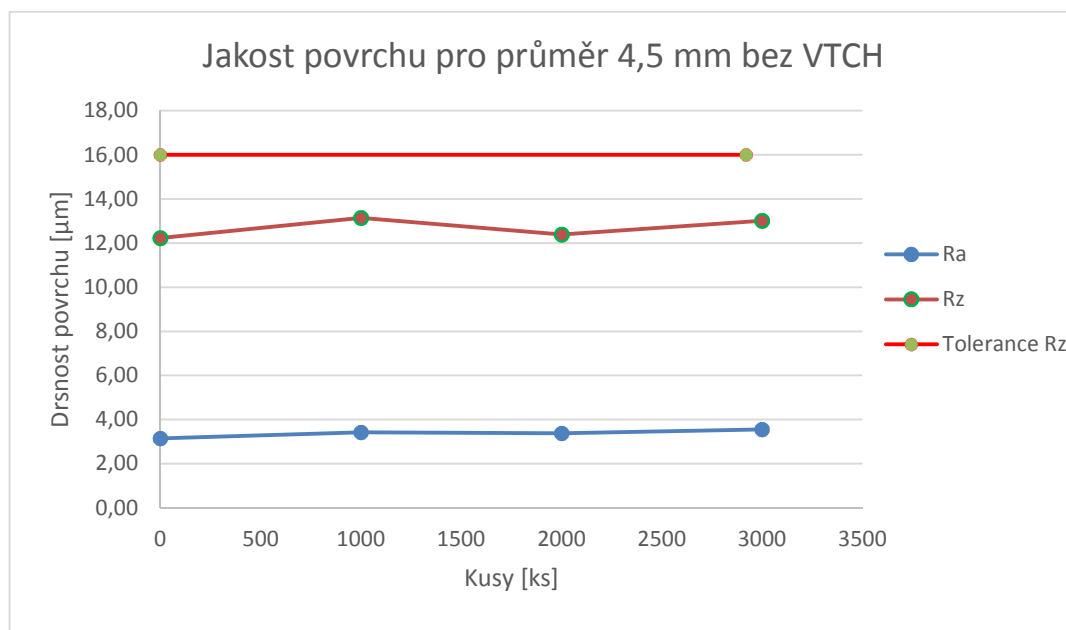
6.2.4 Výsledky bez použití vysokotlakého chlazení

Jakost povrchu

Tolerance pro drsnost povrchu je $R_z = \max. 16 \mu\text{m}$. Naměřené hodnoty jsou v tab. 19 a na obr. 33.

Tab. 19 Drsnost povrchu pro průměr 4,5 mm bez použití vysokotlakého chlazení.

Odběr [ks]	0	1 000	2 000	3 000
R_a [μm]	3,14	3,43	3,38	3,55
R_z [μm]	12,23	13,15	12,39	13,01



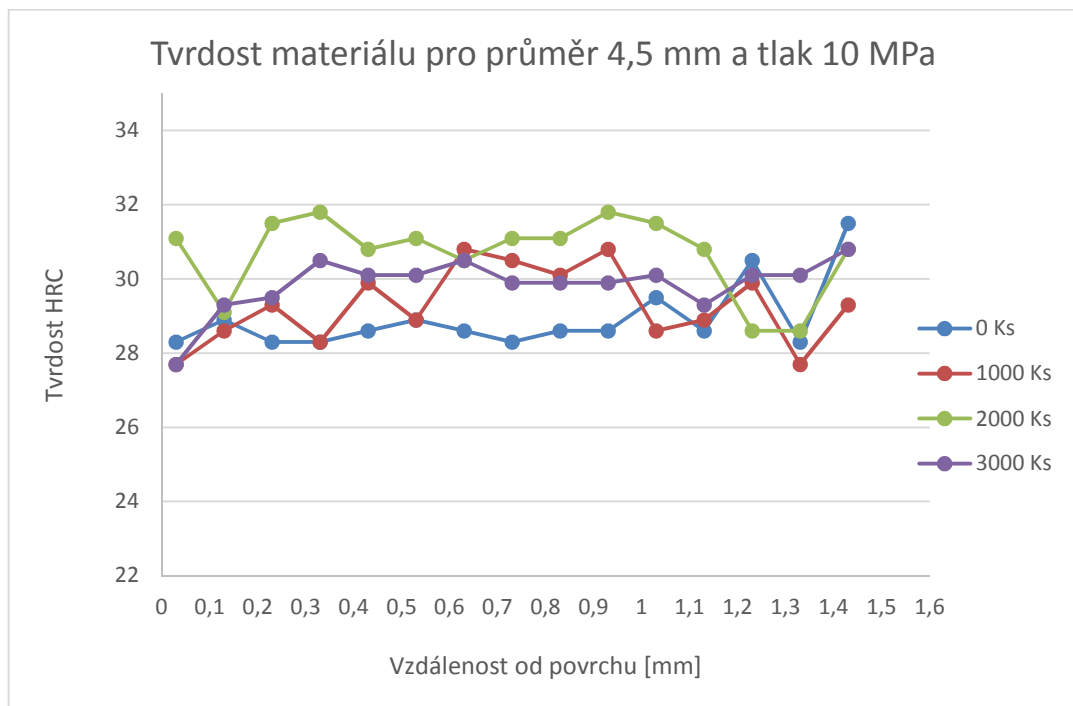
Obr. 33 Grafická závislost drsnosti povrchu u průměru 4,5 mm bez použití vysokotlakého chlazení.

Tvrdość materiálu po obrábění

Tvrdość se i bez použití vysokotlakého chlazení chová stejně, vzrostla, ale trend snižování tvrdości od povrchu není znát. Průběh tvrdości je zachycen v tab. 20 a na obr. 34.

Tab. 20 Tvrdość materiálu po obrábění pro průměr 4,5 mm bez použití vysokotlakého chlazení.

Vzdálenost o povrchu [mm]	0,03	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53	0,63	0,73	0,83	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,43
Odběr [ks]	Tvrdość HRC														
0	28,3	28,9	28,3	28,3	28,6	28,9	28,6	28,3	28,6	28,6	29,5	28,6	30,5	28,3	31,5
1 000	27,7	28,6	29,3	28,3	29,9	28,9	30,8	30,5	30,1	30,8	28,6	28,9	29,9	27,7	29,3
2 000	31,1	29,1	31,5	31,8	30,8	31,1	30,5	31,1	31,1	31,8	31,5	30,8	28,6	28,6	30,8
3 000	27,7	29,3	29,5	30,5	30,1	30,1	30,5	29,9	29,9	29,9	30,1	29,3	30,1	30,1	30,8



Obr. 34 Grafická závislost tvrdosti materiálu pro průměr 4,5 mm bez použití vysokotlakého chlazení.

Trvanlivost nástroje

Podobně jako při 10 MPa a při tlaku 5 MPa zvládly nástroje obrobít všech 3 000 kusů a jejich trvanlivost ještě nebyla vyčerpána. Pro zjištění trvanlivosti bez použití vysokotlakého chlazení je zařazen další test, věnuje se mu kapitola 6.4.

Hodnocení třísek

Počet otlaků nalezených v zakázce se rovněž rovnal jedné. Po 2 000 ks začal nástroj tvořit delší třísky od dokončovacího nástroje (viz obr. 35), ale nijak nebezpečné pro odchod ze stroje.



Obr. 35 třísky po 2 000 ks.

6.3 Soustružení průměru 6 mm

6.3.1 Řezné podmínky

Řezné podmínky jsou pro celý průběh experimentu a především pro všechny tlaky stejné.

- otáčky: $6\,000\text{ min}^{-1}$,
- posuv: 0,21 mm,
- použitý nástroj: TUNGALOY,
- $a_p = 0,59\text{ mm}$.

6.3.2 Výsledky pro tlak 10 MPa

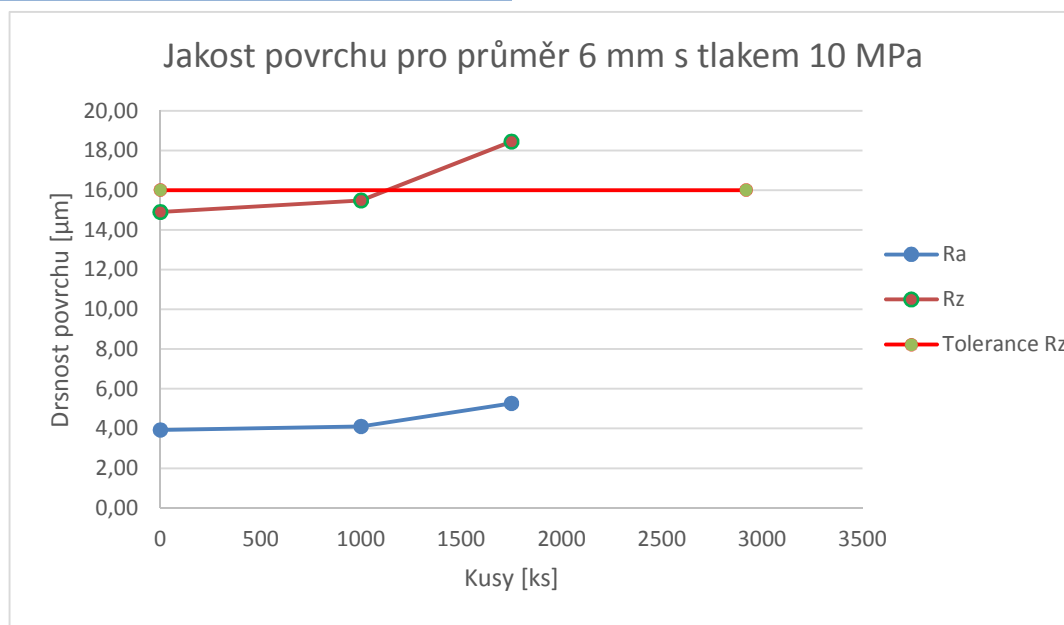
Při zkoušce došlo při 1 750 kusech ke zlomení řezného nástroje vlivem naražení nástroje na tvrdý vměstek v materiálu. Data pro porovnání jsou tedy jen do 1 750 kusu. Zakázka byla poté dokončena s novým nástrojem.

Jakost povrchu

Z dat zachycených v tab. 21 a na obr. 36 lze předpokládat, že kdyby nedošlo k poškození nástroje, bude se s přibývajícými kusy horšit jakost povrchu. Zároveň, je vidět, že se po 1 000 vyrobených kusech dostane hodnota Rz mimo toleranci. Pro další výrobu nepředstavuje překročení tolerance při soustružení problém, obrobek jde na povrchovou úpravu, kde se tolerance pod $Rz = \max. 16\text{ }\mu\text{m}$ dosáhne.

Tab. 21 Drsnost povrchu pro průměr 6 mm a tlak 10 MPa.

Odběr [ks]	0	1 000	1 750
Ra [μm]	3,92	4,10	5,26
Rz [μm]	14,9	15,48	18,45



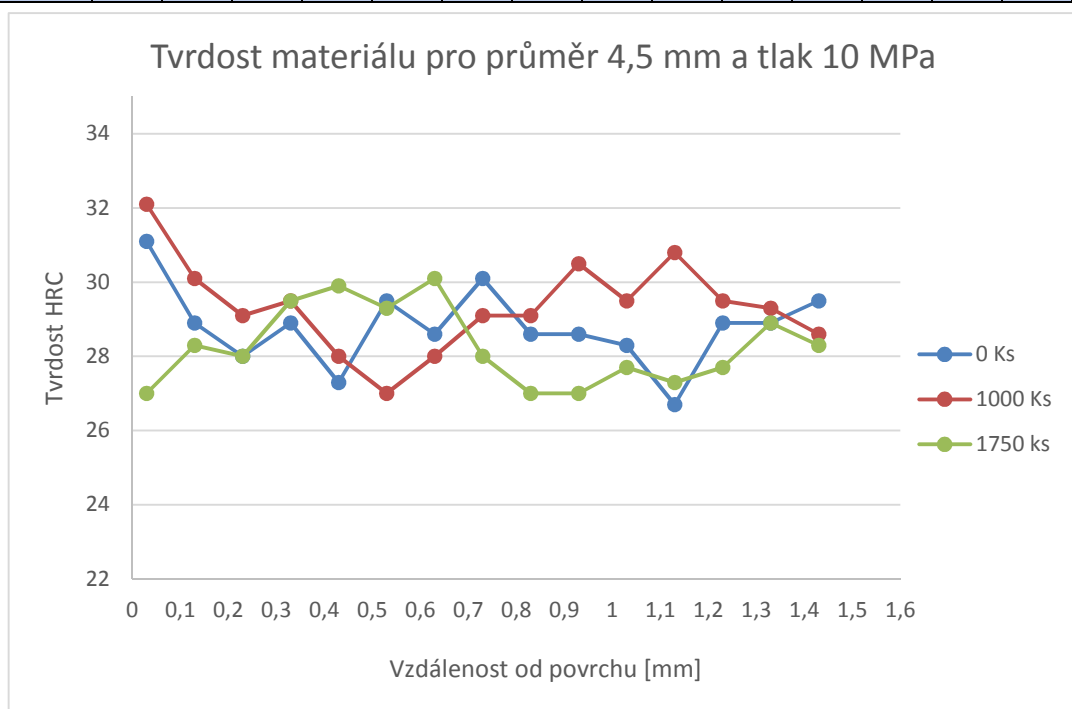
Obr. 36 Grafická závislost drsnosti povrchu u průměru 6 mm a tlaku 10 MPa.

Tvrdość materiálu po obrábění

Pro vyhodnocení tvrdosti jsou rovněž použita data do havárie nástroje. Data zachycuje tab. 22 a obr. 37.

Tab. 22 Tvrdość obrobku o velikosti 6 mm a tlaku 10 MPa.

Vzdálenost o povrchu [mm]	0,03	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53	0,63	0,73	0,83	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,43
Odběr [ks]	Tvrdość HRC														
0	31,1	28,9	28,0	28,9	27,3	29,5	28,6	30,1	28,6	28,6	28,3	26,7	28,9	28,9	29,5
1 000	32,1	30,1	29,1	29,5	28,0	27,0	28,0	29,1	29,1	30,5	29,5	30,8	29,5	29,3	28,6
1 750	27,0	28,3	28,0	29,5	29,9	29,3	30,1	28,0	27,0	27,0	27,7	27,3	27,7	28,9	28,3



Obr. 37 Grafická závislost drsnosti obrobku směrem ke středu obrobku pro průměr 6 mm a tlak 10 MPa.

Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje se určuje obtížně, jelikož došlo k havárii. Jako ukazatel pro rozhodování o přínosu chlazení se použijí ostatní ukazatele.

Hodnocení třísek

Tříška má příznivý tvar a dobře odchází z místa řezu, počet kusů s otlaky od třísek byl 2.

6.3.3 Výsledky pro tlak 5 MPa

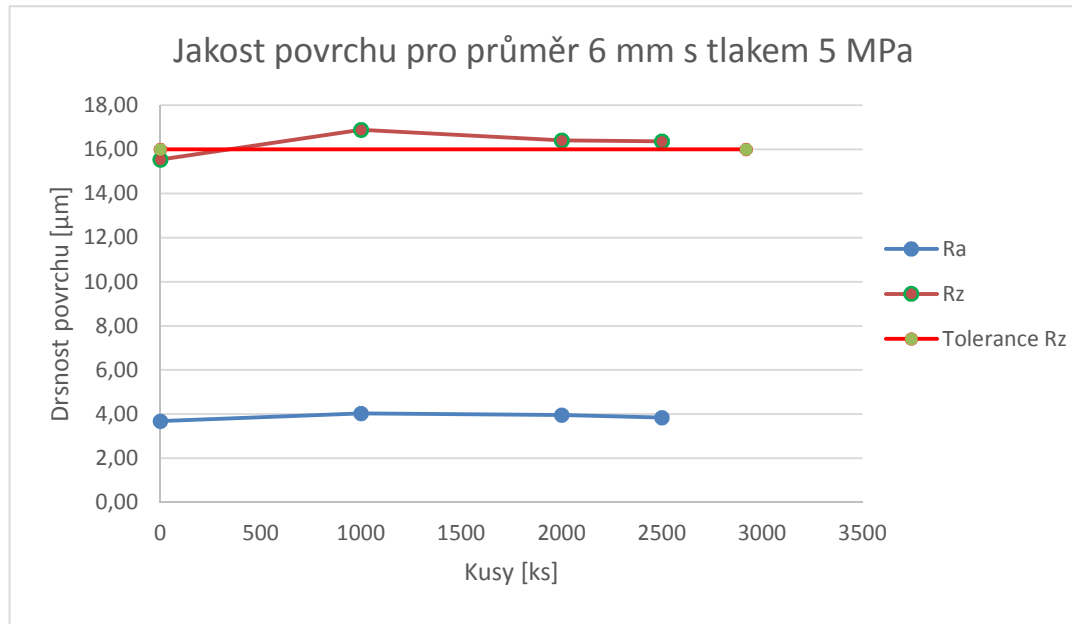
Stejně jako u tlaku 10 MPa i u tlaku 5 MPa došlo k vyštípnutí nástroje, tentokrát při počtu kusů 2 500. Postup hodnocení je stejný jako v prvním případě, zakázka bude hodnocena na 2 500 kusech.

Jakost povrchu

Data jsou zachycena v tab. 23 a na obr. 38. Je z nich poznat, že hodnoty se blíží k toleranci. Pro přípuštění výrobků na další operaci jsou hodnoty v pořádku.

Tab. 23 Drsnost povrchu pro průměr 6 mm a tlak 5 MPa.

Odběr [ks]	0	1 000	2 000	2 500
Ra [μm]	3,68	4,04	3,96	3,84
Rz [μm]	15,53	16,88	16,41	16,36



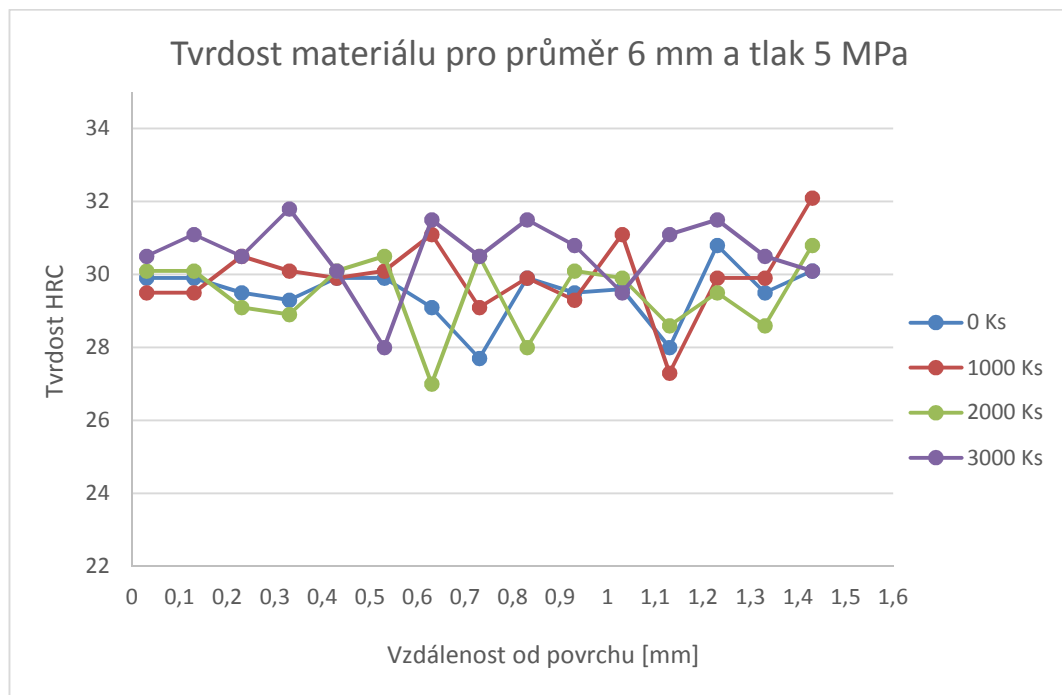
Obr. 38 Grafická závislost drsnosti povrchu u průměru 6 mm a tlaku 5 MPa.

Tvrдость materiálu po obrábění

Pro vyhodnocení tvrdosti, podobně jako v případě s tlakem 10 MPa, budou použita data do havárie nástroje. Data zachycuje tab. 24 a obr. 39. Trend je stejný jako u všech dosud měřených vzorků.

Tab. 24 Tvrдость materiálu po obrábění pro průměr 6 mm a tlak 5 MPa.

Vzdálenost o povrchu [mm]	0,03	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53	0,63	0,73	0,83	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,43
Odběr [ks]	Tvrдость HRC														
0	29,9	29,9	29,5	29,3	29,9	29,9	29,1	27,7	29,9	29,5	29,6	28,0	30,8	29,5	30,1
1 000	29,5	29,5	30,5	30,1	29,9	30,1	31,1	29,1	29,9	29,3	31,1	27,3	29,9	29,9	32,1
2 000	30,1	30,1	29,1	28,9	30,1	30,5	27,0	30,5	28,0	30,1	29,9	28,6	29,5	28,6	30,8
2 500	30,5	31,1	30,5	31,8	30,1	28,0	31,5	30,5	31,5	30,8	29,5	31,1	31,5	30,5	30,1



Obr. 39 Grafická závislost drsnosti obrobku směrem do středu obrobku pro průměr 6 mm a tlak 5 MPa.

Trvanlivost nástroje

Zde se lze setkat s podobným jevem jako u tlaku 10 MPa, jelikož nástroj havaroval před opotřebením. Rovněž je třeba pro posuzování přínosnosti vysokotlakého chlazení brát v úvahu především ostatní ukazatele.

Hodnocení třísek

Počet nalezených otlaků na zakázce byl opět roven 2, tříška byla ovšem již od samého začátku nepříznivá (viz obr. 40), především její délka dělala starosti při odchodu z pracovního prostoru stroje.



Obr. 40 Tříška při tlaku 5 MPa.

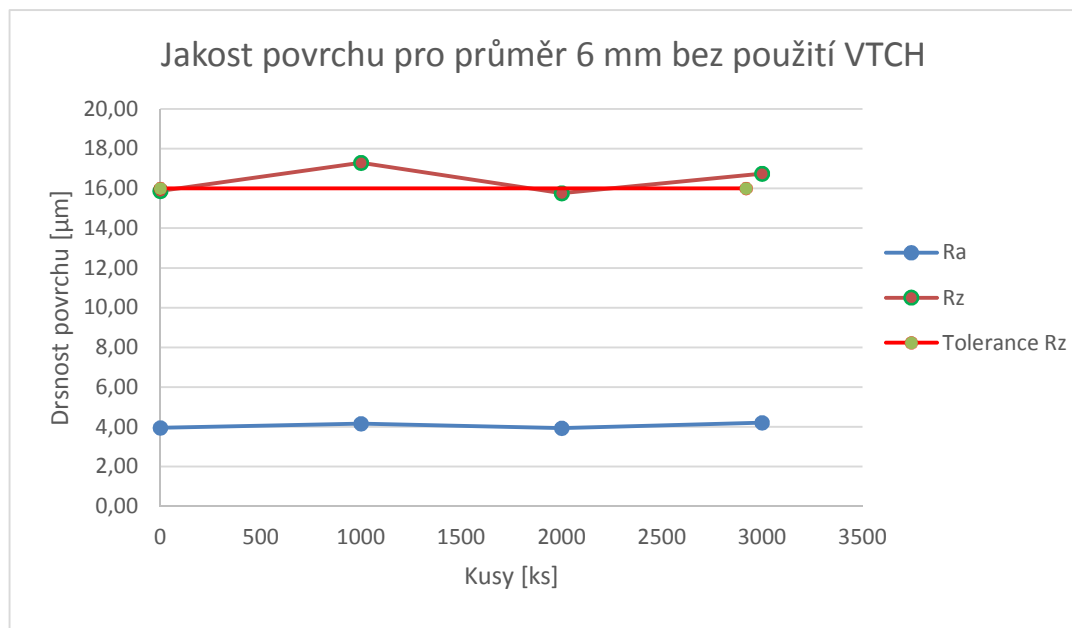
6.3.4 Výsledky bez použití vysokotlakého chlazení

Jakost povrchu

Drsnost povrchu je zachycena na obr. 41 a v tab. 25, hodnoty se rovněž pohybují kolem tolerance. Povrch je tedy z hlediska připuštění k další operaci v pořádku.

Tab. 25 Drsnost povrchu pro průměr 6 mm bez použití vysokotlakého chlazení.

Odběr [ks]	0	1 000	2 000	3 000
Ra [μm]	3,95	4,16	3,94	4,20
Rz [μm]	15,88	17,3	15,76	16,75



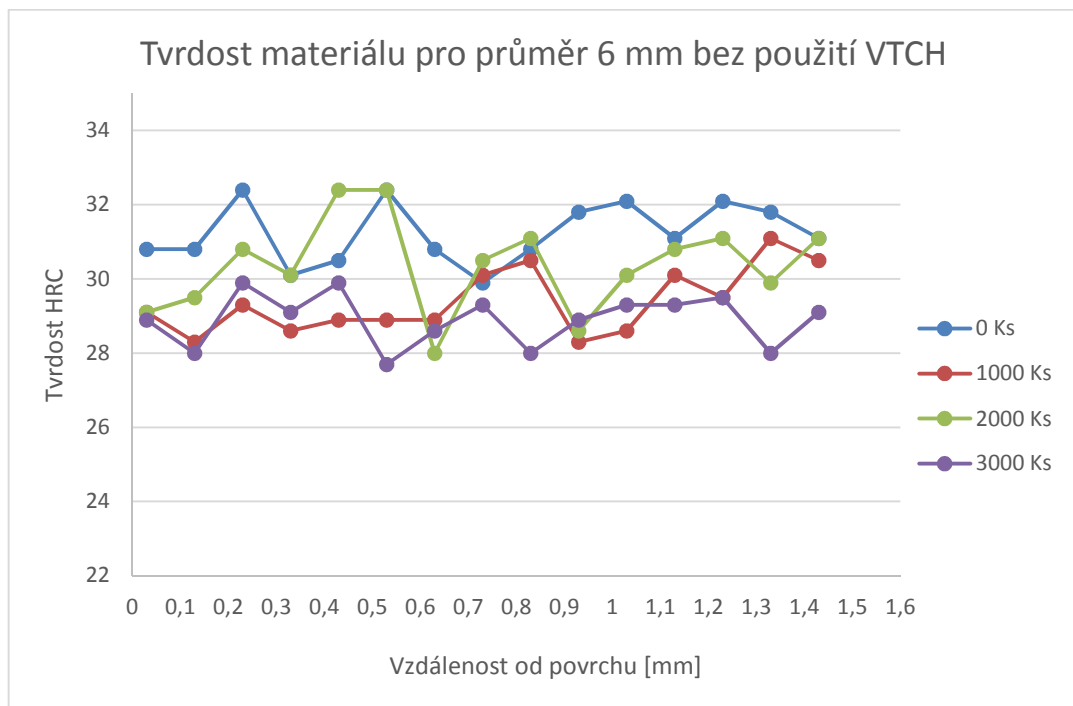
Obr. 41 Grafická závislost drsnosti povrchu u průměru 6 mm bez použití vysokotlakého chlazení.

Tvrдость materiálu po obrábění

Tvrдость má stejný charakter jako ve všech ostatních případech, tedy vzrostla, ale nevykazuje známky toho, že by materiál měl nižší tvrдость směrem do středu obrobku. Průběhy jsou vidět na obr. 42 a v tab. 26.

Tab. 26 Tvrдость materiálu po obrábění pro průměr 6 mm bez použití vysokotlakého chlazení.

Vzdálenost o povrchu [mm]	0,03	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53	0,63	0,73	0,83	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,43
Odběr [ks]	Tvrдость HRC														
0	30,8	30,8	32,4	30,1	30,5	32,4	30,8	29,9	30,8	31,8	32,1	31,1	32,1	31,8	31,1
1 000	29,1	28,3	29,3	28,6	28,9	28,9	28,9	30,1	30,5	28,3	28,6	30,1	29,5	31,1	30,5
2 000	29,1	29,5	30,8	30,1	32,4	32,4	28,0	30,5	31,1	28,6	30,1	30,8	31,1	29,9	31,1
3 000	28,9	28,0	29,9	29,1	29,9	27,7	28,6	29,3	28,0	28,9	29,3	29,3	29,5	28,0	29,1



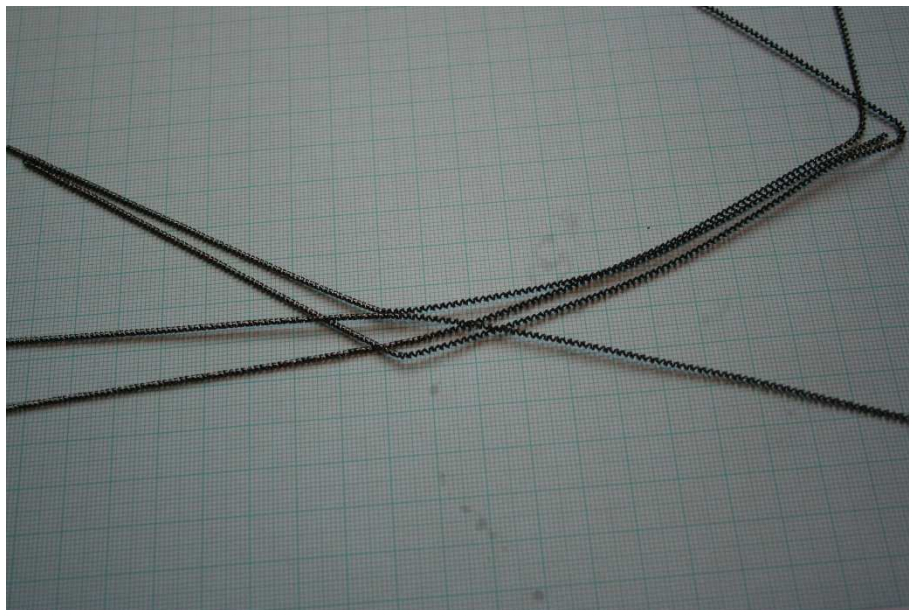
Obr. 42 Grafická závislost tvrdosti materiálu pro průměr 6 mm bez použití vysokotlakého chlazení.

Trvanlivost nástroje

Nástroj zvládl vyrobít celou zakázku 3 000 ks, a stále se jevil jako vhodný pro další použití.

Hodnocení třísek

Třísky podobně jako u tlaku 5 MPa byly problematické svojí délkou (viz obr. 43). Třísky otlaky nezpůsobovaly, byl nalezen jediný kus s otlakem.



Obr. 43 Tříska bez použití vysokotlakého chlazení.

6.4 Rozšíření experimentu o pozorování průměru 4,5 mm

Soustružený průměr 4,5 mm je pro firmu Alfa vůbec nejzajímavější, vyrábí ho ročně nejvíce (v porovnání s průměry 3 mm a 6 mm). Experiment byl rozšířen o dva cíle.

Zjistit, kde leží trvanlivost nástrojů z kapitoly 6.2.2 a 6.2.4 s použitím vysokotlakého chlazení 10 MPa a bez použití vysokotlakého chlazení. O zjištění trvanlivosti u tlaku 5 MPa se neuvažuje, je zde předpoklad, že trvanlivost bude ležet mezi trvanlivostí s a bez použití vysokotlakého chlazení.

Druhým cílem bylo zjištění, zda je možné soustružit průměr 4,5 mm pouze jedním nástrojem a to s použitím vysokotlakého chlazení i bez vysokotlakého chlazení.

6.4.1 Trvanlivost nástrojů

Nástroje z předchozího experimentu byly vráceny na stroj a nastavily se stejné řezné podmínky tedy:

- otáčky: 6 000 min⁻¹,
- posuv: 0,19 mm,
- použité nástroje: VBD WTN1 a VBD WTN2,
 - Oba nástroje jsou v záběru současně, hrubovací nástroj je předsazen před nástroj dokončovací. Dokončovací nástroj je za osou otáčení převrácen kolem své osy o 180°.
- a_p hrubovací destičky 0,69 mm, a_p dokončovací destičky 0,65 mm.

Nástroje obráběly až do vyčerpání trvanlivosti, trvanlivost opět hlídala a stanovila obsluha stroje.

Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje se nakonec zastavila na počtu 6 400 kusů s použitím vysokotlakého chlazení a 5 400 kusů bez použití vysokotlakého chlazení.

Jakost povrchu

Pro úplnost informací zachycuje tab. 27 vývoj jakosti povrchu od začátku soustružení.

Tab. 27 Drsnost povrchu při obrábění průměru 4,5 mm.

Odběr [ks]	0	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	5 400	6 000	6 400
Tlak 10 MPa									
Ra [μ m]	2,80	3,27	3,26	3,46	4,22	4,05	x	3,80	6,69
Rz [μ m]	11,31	12,00	11,22	11,44	15,61	13,75	x	13,09	41,59
Bez použití VTCH									
Ra [μ m]	3,14	3,60	3,74	3,75	3,49	3,48	4,16	x	x
Rz [μ m]	11,27	13,63	13,05	13,37	13,25	14,41	15,02	x	x

Z tabulky je vidět, že na konci trvanlivosti nástroje při použití vysokotlakého chlazení je překročena 2,5x tolerance pro drsnost povrchu. Takové překročení je již důvodem pro zastavení stroje a výměnu nástroje. Ostatní hodnoty se drží pod tolerancí 16 μ m.

6.4 1 Soustružení průměru 4,5 mm jedním nástrojem

Firma Alfa standardně vyrábí průměr 4,5 dvěma nástroji. Cílem tohoto pokusu je zjistit, jakých hodnot dosahuje trvanlivost nástroje při použití jen jednoho nástroje. U těchto experimentů se nehodnotila tvrdost obrobku.

Řezné podmínky:

Řezné podmínky jsou rovněž stejné po celou dobu experimentu, stejně jako pro použití vysokotlakého chlazení i pro soustružení bez vysokotlakého chlazení.

- otáčky: 6 000 min⁻¹,
- posuv: 0,19 mm,
- použitý nástroj: WALTER,
- $a_p = 2,68$ mm.

Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje byla vyčerpána po 3 200 kusech při použití vysokotlakého chlazení a bez použití vysokotlakého chlazení dosáhla hodnoty 2 555 kusů.

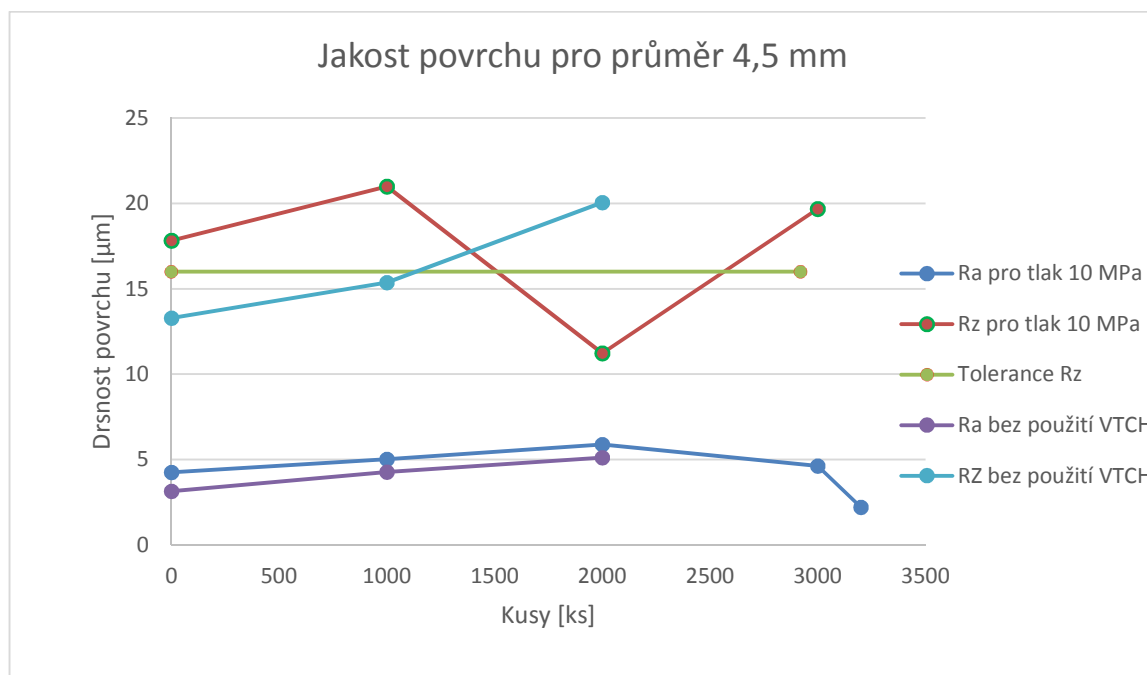
Jakost povrchu

Jakost povrchu u experimentu reprezentuje její drsnost. Drsnost povrchu se hodnotila stejně jako u ostatních experimentů, tedy pomocí Ra a Rz. Drsnost povrchu se nepodařilo změřit na kusech na konci trvanlivosti nástroje bez použití vysokotlakého chlazení. Tříska byla v tomto případě namotána na obrobku.

Hodnoty drsnosti povrchu zachycuje obr. 44 a tab. 28.

Tab. 28 Drsnost povrchu pro průměr 4,5 mm.

Odběr [ks]	0	1 000	2 000	2 555	3 000	3 200
Tlak 10 MPa						
Ra [μm]	4,25	5,03	5,88	x	4,63	2,20
Rz [μm]	17,82	20,99	11,22	x	19,68	9,60
Bez použití VTCH						
Ra [μm]	3,15	4,27	5,11	x	x	x
Rz [μm]	13,28	15,37	20,06	x	x	x



Obr. 44 Grafická závislost drsnosti povrchu pro průměr 4,5 mm.

Je zajímavé, že bez použití vysokotlakého chlazení lze dosáhnout lepších povrchů, než s použitím. Druhou věcí je, že hodnota Ra ke konci trvanlivosti nástroje s použitím kapaliny klesá. To si lze vysvětlit tím, že na nástroji došlo při 2 200 kusů ke korekci nástroje, taky je možné, že se na nástroji zachytila tříška, která tvářela povrch obrobku.

Hodnocení třísek

Třísky se hodnotily stejně jako u ostatních experimentů, tedy počet otlaků od třísek na obrobku a tvar třísky.

S použitím vysokotlakého chlazení byly na zakázce nalezeny 2 ks s otlaky. Tříška byla příznivá až do konce trvanlivosti nástroje, kdy se začala prodlužovat a špatně odcházela ze stroje.

Bez vysokotlakého chlazení bylo nalezeno na zakázce celkem 5 kusů s otlaky a tříška byla příznivá až do konce trvanlivosti nástroje, kdy se tříška začala namotávat na obrobek (viz obr. 45).



Obr. 45 Namotaná tříška na obrobku.

7 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ EXPERIMENTU

Celý experiment proběhl s cílem dostat podklady pro rozhodování o investici do vysokotlakých chladicích jednotek SFB-301 eco. To znamená, vyčíslit návratnost investice. Návratnost investice je vztažena ke každému soustruženému průměru zvlášť. Jednotlivé průměry mají jinou váhu podle toho, kolik jich firma Alfa vyrábí. Firma chce využívat vysokotlaké chlazení na hranici 10 MPa, případné úspory se vyčíslí mezi použitým tlakem 10 MPa a bez použití vysokotlakého chlazení.

7.1 Společné ukazatele

Chladicí jednotka

Cena používané chladicí jednotky SFB-301 eco je 12 950 €, tedy $I = 354\,700$ Kč (kurz pro přepočítání je brán z ČNB dne 25. 5. 2015).

Hodinová sazba stroje

Hodinová sazba stroje je $N_S = 330$ Kč/hod.

Náklad na materiál

Náklad na materiál je pro všechny kusy stejný a je roven $N_M = 2,105$ Kč/ks.

Náklad na použití vysokotlakého chlazení

Náklady jsou stanoveny na $N_{VT} = 8,33$ Kč/hod. při tlaku 10 MPa.

Prodejní cena jednoho kusu výrobku

Cena za jeden kus je stanovena $C = 4,23$ Kč, bez ohledu na průměr.

Správní přírůstek

$S_p = 1,0708$

Takty strojů

Veškeré takty uvedené v kalkulacích jsou odečteny z programu stroje.

7.2 Kalkulace pro průměr 3 mm

Při nastavených řezných podmínkách, byla výroba bez použití vysokotlakého chlazení zastavena již po 100 kusech, důvodem zastavení bylo příliš mnoho otlaků na kusech. Pro výpočet je použito nastavení řezných podmínek, u kterých má firma vyzkoušeno, že lze soustružit průměr 3 mm bez použití vysokotlakého chlazení. Jedná se o otáčky $6\,000\text{ min}^{-1}$ a posuv 0,19 mm. Z podmínek je vypočten takt stroje.

Porovnání bude tedy provedeno pro případ, kdy vysokotlaké chlazení dovoluje nastavit větší rychlosti a tím zkrátit výrobní čas.

Bez použití vysokotlakého chlazení

Takt: $t_3 = 15,4$ s

Počet vyrobených kusů za hodinu

$$Q_{h3} = \frac{3\,600}{t_3} \text{ [ks]} \quad (7.1)$$

$$Q_{h3} = \frac{3\,600}{t_3} = \frac{3\,600}{15,4} = 233,76 \Rightarrow 233 \text{ ks}$$

Náklady na výrobu jednoho kusu

$$N_3 = \left(\frac{t_3 \cdot N_S}{3\,600} + N_M \right) \cdot S_p \text{ [Kč]} \quad (7.2)$$

$$N_3 = \left(\frac{t_3 \cdot N_S}{3\,600} + N_M \right) \cdot S_p = \left(\frac{15,4 \cdot 330}{3\,600} + 2,105 \right) \cdot 1,0708 = 3,767 \text{ Kč}$$

Ziskovost jednoho kusu

$$Z_j = C - N_3 \text{ [Kč]} \quad (7.3)$$

$$Z_j = C - N_3 = 4,23 - 3,767 = 0,463 \text{ Kč}$$

Hodinová ziskovost

$$Z_h = Z_j \cdot Q_{h3} \text{ [Kč]} \quad (7.4)$$

$$Z_h = Z_j \cdot Q_{h3} = 0,463 \cdot 233 = 107,879 \text{ Kč}$$

S použitím vysokotlakého chlazení

Takt: $t_{3VT} = 13,9 \text{ s}$

Počet vyrobených kusů za hodinu

$$Q_{h3VT} = \frac{3\,600}{t_{3VT}} \text{ [ks]} \quad (7.5)$$

$$Q_{h3VT} = \frac{3\,600}{t_{3VT}} = \frac{3\,600}{13,9} = 258,99 \Rightarrow 258 \text{ ks}$$

Náklady na výrobu jednoho kusu

$$N_{3VT} = \left(\frac{t_{3VT} \cdot (N_S + N_{VT})}{3\,600} + N_M \right) \cdot S_p \text{ [Kč]} \quad (7.6)$$

$$N_{3VT} = \left(\frac{t_{3VT} \cdot (N_S + N_{VT})}{3\,600} + N_M \right) \cdot S_p = \left(\frac{13,9 \cdot (330 + 8,33)}{3\,600} + 2,105 \right) \cdot 1,0708 = 3,653 \text{ Kč}$$

Ziskovost jednoho kusu

$$Z_{jVT} = C - N_{3VT} \text{ [Kč]} \quad (7.7)$$

$$Z_{jVT} = C - N_{3VT} = 4,23 - 3,656 = 0,574 \text{ Kč}$$

Hodinová ziskovost

$$Z_{hVT} = Z_{jVT} \cdot Q_{h3VT} \text{ [Kč]} \quad (7.8)$$

$$Z_{hVT} = Z_{jVT} \cdot Q_{h3VT} = 0,574 \cdot 258 = 148,092 \text{ Kč}$$

ÚsporyÚspora kusů za jednu hodinu práce

$$U_k = Q_{h3VT} - Q_{h3} \text{ [ks]} \quad (7.9)$$

$$U_k = Q_{h3VT} - Q_{h3} = 258 - 233 = 25 \text{ ks}$$

Finanční úspora za jednu hodinu práce

$$U_f = Z_{hVT} - Z_h \text{ [Kč]} \quad (7.10)$$

$$U_f = Z_{hVT} - Z_h = 148,092 - 107,879 = 42,231 \text{ Kč}$$

Ziskovost za jeden den

Při počtu směn $s = 3$ a délce směny $h = 8$ hod.

$$Z_D = U_f \cdot h \cdot s \text{ [Kč]} \quad (7.11)$$

$$Z_D = U_f \cdot h \cdot s = 42,231 \cdot 8 \cdot 3 = 1\,013,52 \text{ Kč}$$

Návratnost investice

$$NI = \frac{I}{Z_D} \text{ [dny]} \quad (7.12)$$

$$NI = \frac{I}{Z_D} = \frac{354\,700}{1\,013,52} = 349,97 \Rightarrow 350 \text{ dnů}$$

Jedná se o výpočet návratnosti investice pouze na základě změny řezných podmínek, další úspory vznikají větší trvanlivostí nástrojů a menším počtem obrobků s otlaky od třísky. Tyto úspory dobu návratnosti investice ještě zkrátí.

7.3 Kalkulace pro průměr 4,5 mm

Při nastavení řezných podmínek pro soustružení průměru 4,5 mm bylo možné vyrábět za všech použitých tlaků chlazení. Nelze tedy vyčíslit úspory od zněn v řezných podmínkách. Lze ovšem vyčíslit úspory z větší trvanlivosti nástroje.

Náklady na nástroje jsou započítány v hodinové sazbě stroje. Pro přesné vyčíslení úspor od větší trvanlivosti by bylo třeba, tyto náklady z hodinové sazby stroje vyjmou a připočítávat k nákladům na výrobek samostatně.

Výpočet nákladů a úspor nástrojů

Takt: $t_{4,5} = 15,4$ s

Počet vyrobených kusů za hodinu

$$Q_{h4,5} = \frac{3\,600}{t_{4,5}} \text{ [ks]} \quad (7.13)$$

$$Q_{h4,5} = \frac{3\,600}{t_{4,5}} = \frac{3\,600}{15,4} = 233,76 \Rightarrow 233 \text{ ks}$$

Bez použití vysokotlakého chlazení – dva nástroje

Trvanlivost nástroje $T_{4,5} = 5\,400$ ks a cena nástrojů je $C_N = 270,05$ Kč.

Náklady na nástroje za jednu hodinu práce

$$N_{hN} = \frac{C_N}{T_{4,5}} \cdot Q_{h4,5} \text{ [Kč]} \quad (7.14)$$

$$N_{hN} = \frac{C_N}{T_{4,5}} \cdot Q_{h4,5} = \frac{270,05}{5\,400} \cdot 233 = 11,652 \text{ Kč}$$

S použitím vysokotlakého chlazení – dva nástroje

Trvanlivost nástroje $T_{4,5VT} = 6\,400$ ks a cena nástrojů je $C_N = 270,05$ Kč.

Náklady na nástroje za jednu hodinu práce

$$N_{hNVT} = \frac{C_N}{T_{4,5VT}} \cdot Q_{h4,5} \text{ [Kč]} \quad (7.15)$$

$$N_{hNVT} = \frac{C_N}{T_{4,5VT}} \cdot Q_{h4,5} = \frac{270,05}{6\,400} \cdot 233 = 9,832 \text{ Kč}$$

Úspory – dva nástroje

Hodinová úspora na nástroji

$$U_N = N_{hN} - N_{hNVT} \text{ [Kč]} \quad (7.16)$$

$$U_N = N_{hN} - N_{hNVT} = 11,652 - 9,832 = 1,82 \text{ Kč}$$

Bez použití vysokotlakého chlazení – jeden nástroj

Trvanlivost nástroje $T_{4,5} = 2\,555$ ks a cena nástrojů je $C_N = 220$ Kč.

Náklady na nástroj za jednu hodinu práce

$$N_{hN} = \frac{C_N}{T_{4,5}} \cdot Q_{h4,5} \text{ [Kč]} \quad (7.17)$$

$$N_{hN} = \frac{C_N}{T_{4,5}} \cdot Q_{h4,5} = \frac{220}{2\,555} \cdot 233 = 20,063 \text{ Kč}$$

S použitím vysokotlakého chlazení – jeden nástroj

Trvanlivost nástroje $T_{4,5VT} = 3\,200$ ks a cena nástrojů je $C_N = 220$ Kč.

Náklady na nástroj za jednu hodinu práce

$$N_{hNVT} = \frac{C_N}{T_{4,5VT}} \cdot Q_{h4,5} \text{ [Kč]} \quad (7.18)$$

$$N_{hNVT} = \frac{C_N}{T_{4,5VT}} \cdot Q_{h4,5} = \frac{270,05}{3\,200} \cdot 233 = 16,019 \text{ Kč}$$

Úspory – jeden nástrojHodinová úspora na nástroji

$$U_N = N_{hN} - N_{hNVT} \text{ [Kč]} \quad (7.19)$$

$$U_N = N_{hN} - N_{hNVT} = 20,063 - 16,019 = 4,044 \text{ Kč}$$

7.4 Kalkulace pro průměr 6 mm

Data u soustružení průměru 6 mm byly poškozeny vyštípnutím nástroje. Ekonomické hodnocení procesu je tedy problematické. Pro firmu Alfa je dostačující, že se u ostatních průměrů potvrzuje přínos vysokotlakého chlazení a je zde předpoklad, že úspory přinese i u průměru 6 mm. Pro potvrzení předpokladu by bylo ovšem třeba experiment zopakovat.

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU – POROVNÁNÍ SE SOUČASNĚ POUŽÍVANOU TECHNOLOGIÍ

Experimentální zkoušky probíhaly ve firmě Alfa, která chtěla zjistit přínosy vysokotlakého chlazení na výrobu jejich artiklů a porovnat je s obráběním pomocí konvenčního chlazení. Za současně používanou technologii je tedy bráno soustružení bez použití vysokotlakého chlazení.

Do experimentu byly zařazeny celkem 3 soustružené průměry 3 mm; 4,5 mm a 6 mm, které se vyrábějí v milionech kusů za rok a jakékoli, i drobné zlepšení technologie povede k nezanedbatelným úsporám. Experiment probíhal v reálném výrobním prostředí se všemi aspekty, které k tomu patří.

Hodnocení tvrdosti po obrábění

Sledovat změnu tvrdosti v průřezu obrobku byl požadavek výrobního ředitele společnosti. Mělo se zjistit, jestli dochází ke změnám v tvrdosti. Především, jestli je tvrdost blíže k povrchu větší, než u středu obrobku. Případný trend se měl popsat a zahrnout do technologie výroby, především pro operaci kalení.

Vzorky vykazují pro všechny soustružené průměry a pro všechny tlaky podobné výsledky. Tvrdost polotovaru je 25 HRC, dá se tedy říci, že tvrdost po soustružení vzrostla až o 7 jednotek HRC bez ohledu na použitou velikost tlaku. Napříč všemi rozměry a použitými tlaky není vidět trend snižování tvrdosti směrem ke středu materiálu. Z experimentu vyplývá, že vysokotlaké chlazení má na změnu tvrdosti materiálu po obrábění minimální vliv.

Po rozšíření experimentu u průměrů 4,5 mm se z tohoto důvodu už nezařazovaly zkoušky na zjištění tvrdosti, protože se předpokládaly stejné výsledky jako doposud.

Hodnocení jakosti povrchu

Pro hodnocení jakosti povrchu se měřily hodnoty Ra a Rz, přičemž na všech výrobcích experimentu je předepsaná tolerance Rz = max. 16 μm. Dle literatury [1, 2] má mít vysokotlaké chlazení vliv na drsnost povrchu, což se částečně potvrzuje. Při zachování řezných podmínek a při změně tlaků dochází i ke změnám v drsnosti povrchu, ne vždy je ovšem při snížení tlaku viditelná horší drsnost povrchu. V rámci jedné řezných podmínek, se průběhy drsností i při změně tlaků kopírují a liší se jen minimálně. Větší výkyvy v drsnosti povrchu přicházely až s koncem trvanlivosti nástroje, kde poškozený nástroj vytvářel nekvalitní povrch.

Větší vliv na drsnost povrchu má nastavení posuvu nástroje. Nižší posuvy logicky vytvářejí hladší povrch, ale za cenu vyšších časů výroby. V experimentu bylo použito celkem třech posuvů 0,23 mm; 0,21 mm a 0,19 mm. U nejnižšího posuvu se dařilo držet hodnotu Rz celou dobu soustružení pod tolerancí, naopak u posuvu 0,23 mm se hodnoty Rz na toleranci nedostaly. U posuvu 0,21 mm se toleranci dařilo celkem dodržovat, i když ne zcela.

Zde je vidět příklad z praxe, kde vedení výroby ve firmě Alfa o nedodržení tolerance ví, ale její nedodržování není důvodem pro zastavení výroby. Obrobky jdou ještě na povrchovou úpravu a tolerance se hodnotí až poté. Nabízí se tedy doporučení nastavovat posuvy co největší, sice se nedodrží tolerance, ale zkrátí se výrobní časy.

Hodnocení trvanlivosti nástroje

Zde je přínos vysokotlakého chlazení zcela prokazatelný. Až na průměr 6 mm, kde došlo ke zničení nástroje před opotřebením a není možné přínos tlakového chlazení kvantifikovat, mělo snížení tlaku vždy za následek snížení trvanlivosti nástroje.

Průměr 3 milimetry

Při tlaku 10 MPa měl nástroj trvanlivost 3 000 ks, což odpovídá výrobní dávce. Ze strany společnosti je požadavek, aby nástroje dosahovaly u těchto artiklů právě trvanlivosti minimálně 3 000 ks.

Při snížení tlaku na 5 MPa se trvanlivost zastavila pod hranicí 3000 ks na čísle 2 920 ks. Pro dokončení dávky se musel nasadit nástroj nový a to zdržuje výrobu. Trvanlivost je se snížením tlaku nižší, ale jen o 80 kusů.

Při vypnutí vysokotlakého chlazení se při používaných řezných podmínkách musela výroba zastavit po pouhých 100 obrobených kusech.

Průměr 4,5 milimetrů

U průměrů 4,5 mm se trvanlivost nástrojů při tlaku chladicí kapaliny 10 MPa dostala až na hodnotu 6 400 ks a při konvenčním chlazení na hodnotu 5 400 ks. Poměrově jde o nárůst trvanlivosti o 18,5 %. Nutno dodat, že řezné podmínky byly jiné, než při soustružení průměru 3 mm, což se na trvanlivosti nástroje projeví.

Průměr 4,5 mm se soustružil i jedním nástrojem, zde trvanlivost při tlaku 10 MPa dosáhla hodnoty 3 200 ks a při konvenčním chlazení 2 555 ks. Opět je zde přítomen nárůst trvanlivosti o 25,2 %.

Na první pohled se může zdát, že soustružení jedním nástrojem je u průměru 4,5 mm výhodnější. Ekonomický propočít ukázal opak, náklady na hodinu práce při tlaku 10 MPa a použití jednoho nástroje dosahují 16,019 Kč. Oproti tomu při použití dvou nástrojů a stejného tlaku jsou náklady nástroje na hodinu obrábění 9,832 Kč. Vždy jde ovšem o úsporu oproti konvenčnímu chlazení. V případě jednoho nástroje o 4,044 Kč/hod. V případě dvou nástrojů o 1,82 Kč/hod.

Doporučení je používat při obrábění průměru 4,5 mm dvou nástrojů a tlaku chladicí kapaliny 10 MPa. Vždy bude ovšem nejvíc záležet na nákupní ceně nástrojů a řezných podmínkách.

Hodnocení třísky

Tříska se hodnotila ze dvou hledisek, zdali nepoškozují obrobek a jestli její tvar a velikost nebrání snadnému odchodu třísky z pracovního prostoru stroje. Zde je přínos vysokotlakého chlazení rovněž prokazatelný.

Poškozování obrobku

Otlaky, které třísky mohou zanechat na obrobcích, udělají z obrobku neshodný kus. Takto poškozené obrobky se musí vykázt jako odpad. Největších přínosů dosahovalo použití vysokotlakého chlazení u soustružení průměru 3 mm, kde s použitím tlaku 10 MPa, bylo na obrobcích nalezeno 10 ks s otlaky. Při snížení na 5 MPa jich bylo 47 ks a při konvenčním chlazení se otlaky nalézaly na 25 % kusů, což byl důvod pro zastavení výroby.

Při soustružení průměru 4,5 mm jedním nástrojem byly při tlaku 10 MPa nalezeny 2 ks obrobků s otlakem a při vypnutí tlakového chlazení jich bylo celkem 5 ks.

U průměru 6 mm se našel jediný kus s otlakem u každého použitého tlaku.

Lze tedy říci, že se vzrůstajícím objemem odebraného materiálu je přínos vysokotlakého chlazení vzhledem k odchodu třísek z místa řezu větší.

Velikost třísek

Zde také lze pozorovat přínos tlakového chlazení. Při používání tlakového chlazení se třísky lámou na menší kusy a nezpůsobují problémy. S rostoucím počtem obrobků a tedy s otupováním nástroje se u nižších tlaků chladicí kapaliny prodlužovaly třísky a způsobovaly komplikace.

Přínosy a doporučení vysokotlakého chlazení

Největším přínosem vysokotlakého chlazení je možnost nastavit větší posuvy, tím se výrazně dá ušetřit na výrobních časech. Nástroje jsou přitom díky dobrému mazání a chlazení chráněny a jejich trvanlivost zůstává stejná, či dokonce roste.

Při soustružení průměru 3 mm vysokotlak dovolil nastavit posuv z 0,19 mm na 0,23 mm, což vedlo ke zvýšení produkce o 25 kusů za hodinu a zlevnění výroby, tedy i k růstu ziskovosti. Propočtem bylo zjištěno, že za jediný den se i na tak malém objemu odebíraného materiálu jako je u průměru 3 mm dá navýšit zisk o 1 013,52 Kč a to jen změnou posuvu, další úspory přináší delší trvanlivost a méně obrobků poškozených od třísek. Investice do vysokotlaké jednotky má rentabilitu v řádů desítek týdnů. V případě experimentu u průměru 3 mm to je 350 dnů.

Doporučení tedy je využívat maximální tlak chladicí kapaliny, který zařízení dovoluje a nastavovat řezné podmínky na horní hranici doporučených podmínek od výrobců nástrojů.

Konkrétní systém SFB-301 eco, který je používán v experimentu, je standardně dodáván s filtrem, který zachycuje nečistoty o velikosti nad 40 μm . Literatura [1, 2] uvádí propustnost filtru 40 μm jako nedostačující. Změnou na filtr s menší propustností se dá ještě zvýšit trvanlivost nástrojů.

ZÁVĚR

Literatura o systémech vysokotlakého chlazení mluví velice příznivě a předkládá oblasti, kde vysokotlaké chlazení zlepšuje proces obrábění o nemalá procenta. Diplomová práce v rámci experimentu vyzkoušela vysokotlaké chlazení v praxi a z diplomové práce vyplynuly tyto závěry:

- trvanlivost nástrojů se při použití tlakového chlazení zvedla o 18 % až 25 %,
- největší vliv na drsnost povrchu při soustružení má nastavení řezných podmínek, především otáček a posuvu, vysokotlaké chlazení samotnou drsnost ovlivňuje minimálně,
- při soustružení dochází ke zvýšení tvrdosti obrobku oproti tvrdosti polotovaru, tlak chladicího média na to nemá žádný vliv,
- tlak chladicí kapaliny pomáhá odvádět a lámat třísky vzniklé při obrábění. Experiment ukázal, že čím větší je objem odebíraného materiálu, tím více vysokotlak pomáhá chránit obrobek proti poškození od třísky. U průměru 3 mm šlo o 4,3 x lepší výsledky u tlaku 10 MPa oproti tlaku 5 MPa,
- vysokotlaké chlazení dovoluje výrazně zvednout řezné podmínky při zachování či dokonce růstu trvanlivosti nástrojů. V případě experimentu šlo o zvednutí posuvu z 0,19 mm na 0,23 mm, což mělo za následek snížení taktu o 1,5 sekund a zvýšení ziskovosti výroby o 1 013,52 Kč za den,
- vysokotlaké chladicí jednotky mají rentabilitu v řádu několika desítek týdnů, v případě experimentu šlo o návratnost za 350 dnů a to jen z úspor za zvýšení posuvu,
- při pořízení zařízení na vysokotlaké chlazení se vyplatí maximálně využívat jeho možností, tedy používat tlak minimálně 7 MPa a nastavovat řezné podmínky na největší doporučená čísla,
- filtrace kapaliny je pro chladicí jednotky velice důležitá, drobné částičky v kapalině v kombinaci s tlakem působí velice abrazivně na nástroj, stroj a obrobek. Maximální doporučená velikost filtru pro vysokotlaké chlazení je 20 μm .

Všechny cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. OSKAR ZEMČÍK. 2014. *Speciální technologie obrábění, přednášky: HSM obrábění*. Brno.
4. *Emulze*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/emulze.html
5. DEDERLE, Tomáš a Jiří HEJNÍK. 2007. *Proč dlouhotočný automat* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/proc-dlouhotocny-automat.html>
6. *Automatický soustruh XD35N* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.profika.cz/cnc-stroje/5-osy-cnc-automaticky-soustruh-xd35n#lightbox>
7. *T-support: jak zvolit správné chlazení pro obráběcí stroj* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.t-support.cz/kat/jak-zvolit-spravne-chlazen-pro-obrabeci-stroj>
8. *Technický portál: Vysokotlaké chlazení s proměnlivým průtokem kapaliny* [online]. 2013. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/vysokotlake-chlazen-s-promenlivym-prutokem-kapaliny_21941.htm
9. *Soustružnické nástroje pro vysokotlaké chlazení* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.iscar.cz/Products.aspx/CountryId/6/ProductId/10165>
10. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
11. SANDVIK COROMANT. *Výhody vysokotlakého chladicího systému* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/featured-articles/pages/benefits-of-high-pressure-coolant.aspx>
12. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. 2002. *Vysokotlaké chlazení pro obrábění* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokotlake-chlazen-pro-obrabeni-2.html>
13. INDUSTRYE.U. *Nástroje se směrovaným přívodem chladicí kapaliny pod vysokým tlakem: SECO* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.industry-eu.cz/novinky-a-clanky/novinky-ve-strojirenstvi/nastroje-se-smerovanim-privodem-chladici-kapaliny-pod-vysokym-tlakem>
14. PRŮMYSL. *Walter představil na veletrhu EMO kryogenní chlazení* [online]. 2013 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.prumysl.cz/walter-predstavil-na-emo-kryogenni-chlazen/>

15. T-SUPPORT. *Vysoký tlak šetří energii při třískovém obrábění* [online]. 2010 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.t-support.cz/kat/vysoky-tlak-setri-energii-pri-triskovem-obrabeni>
16. PAVLOK, Bohuslav, Moderní čištění hydraulických olejů, MM spektrum [online]. 2008, roč.12, č.1 [cit. 2009-06-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-metody-cistenihydraulickych-oleju>
17. *Buchele SF – systeme* [online]. 2010 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: www.sf-systeme.de
18. *WNT* [online]. 2010 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: https://www.toolingcenter.com/?fcode=m_home
19. *WALTER* [online]. [cit. <http://www.walter-tools.com/cs-cz/Pages/default.aspx>]. Dostupné z: https://www.toolingcenter.com/?fcode=m_home
20. *TUNGALOY* [online]. [cit. <http://www.walter-tools.com/cs-cz/Pages/default.aspx>]. Dostupné z: <http://www.tungaloy.co.jp/cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
APO	[-]	Automatic Variable Volume
CNC	[-]	Computer numeric control
CO₂	[-]	Oxid uhličitý
ČNB	[-]	Česká národní banka
HRA	[-]	Tvrdost dle Rockwella
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička
VTCH	[-]	Vysokotlaké chlazení

Symbol	Jednotka	Popis
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
C	[Kč]	Cena výrobku
C	[-]	Uhlík
C_N	[Kč]	Cena nástroje
Cr	[-]	Chrom
E_c	[J]	Práce řezání
E_d	[J]	Disperzní práce
E_{el}	[J]	Práce nutná k překonání elastických deformací
E_f	[J]	Práce posuvu
E_p	[J]	Práce řezného procesu
E_{pl}	[J]	Práce nutná k překonání plastických deformací
E_t	[J]	Práce nutná k překonání tření
E_α	[J]	Překonání tření hřbetu nástroje po řezné ploše
E_γ	[J]	Překonání tření třísky po čele nástroje
F_c	[N]	Řezná síla
F_e	[N]	Výsledná řezná síla
F_f	[N]	Posuvová síla
h	[hod]	Počet hodin za směnu
I	[Kč]	Cena investice
Mn	[-]	Molybden
M_x	[-]	Počet částic za filtrem
N₃	[Kč]	Náklady na výrobu jednoho kusu, 3 mm
N_{3VT}	[Kč]	Náklady na výrobu jednoho kusu, 3 mm s VTCH
N_{hN}	[Kč]	Náklady na nástroje za jednu hodinu práce bez VTCH

N_{hN}	[Kč]	Náklady na nástroje za jednu hodinu práce s VTCH
NI	[Dny]	Návratnost investice ve dnech
N_M	[Kč/ks]	Náklady na materiál
N_S	[Kč/hod]	Náklady na hodinu práce stroje
N_{VT}	[Kč/hod]	Náklady na použití vysokotlakého chlazení
N_x	[-]	Počet částic před filtrem
P	[-]	Fosfor
P_e	[W]	Pracovní výkon
Q	[J]	Celková tepelná energie
Q_{h3}	[ks]	Počet vyrobených kusu o průměru 3 mm za jednu hodinu bez použití vysokotlakého chlazení
Q_{h3VT}	[ks]	Počet vyrobených kusu o průměru 3 mm za jednu hodinu s použitím vysokotlakého chlazení
$Q_{h4,5}$	[ks]	Počet vyrobených kusu o průměru 4,5 mm za jednu hodinu bez použití vysokotlakého chlazení
$Q_{h4,5}$	[ks]	Počet vyrobených kusu o průměru 4,5 mm za jednu hodinu s použitím vysokotlakého chlazení
Q_{Ch}	[J]	Teplo od utváření a dělení třísky
Q_{Sh}	[J]	Teplo od plastické deformace ve smykové rovině
Q_a	[J]	Teplo od tření mezi obrobenu plochou a hřbetem nástroje
Q_γ	[J]	Teplo od tření mezi třískou a čelem nástroje
R_q	[μm]	střední kvadratická hodnota drsnosti
s	[-]	Počet směn za den
S	[-]	Síry
Si	[-]	Křemík
Sp	[-]	Správná přiřážka
t_3	[s]	Takt výroby pro průměr 3 mm bez použití vysokotlakého chlazení
t_{3VT}	[s]	Takt výroby pro průměr 3 mm s použitím vysokotlakého chlazení
$t_{4,5}$	[s]	Takt výroby pro průměr 4,5 mm bez použití vysokotlakého chlazení
$T_{4,5}$	[ks]	Trvanlivost nástroje pro výrobu průměru 4,5 mm bez použití vysokotlakého chlazení
$t_{4,5VT}$	[s]	Takt výroby pro průměr 4,5 mm s použitím vysokotlakého chlazení
$T_{4,5VT}$	[ks]	Trvanlivost nástroje pro výrobu průměru 4,5 mm s použitím vysokotlakého chlazení
t_p	[s]	Čas řezného procesu
U_f	[Kč]	Finanční úspora za jednu hodinu práce
U_k	[Kč]	Úspora kusů za jednu hodinu práce
U_N	[Kč]	Hodinová úspora na nástroji
V	[-]	Vanad
v_c	[min^{-1}]	řezná rychlost
v_e	[min^{-1}]	Výsledná řezná rychlost
v_f	[min^{-1}]	Posuvová rychlost
Z_D	[Kč]	Ziskovost za jeden den

Z_h	[Kč]	Hodinová ziskovost
Z_{hVT}	[Kč]	Hodinová ziskovost s VTCH
Z_j	[Kč]	Ziskovost jednoho kusu
Z_{jVT}	[Kč]	Ziskovost jednoho kusu s VTCH
β_x	[-]	Filtrační koeficient
η_x	[%]	Účinnost filtru

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Katalogové listy STAR SW-20
Příloha 2 Katalogové listy SFB-301 eco
Příloha 3 Katalogové listy Ilocut 522 MP