

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nové trendy v oblasti konstrukce nástrojů

Autor: **Jan JURČÍK**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

Originál (kopie) zadání BP/DP

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Jurčík	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	BAKALÁŘSKÁ	DIPLOMOVÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Nové trendy v oblasti konstrukce nástrojů		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEV.	2013
----------------	---------	----------------	-----	------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	44	TEXTOVÁ ČÁST	42	GRAF. ČÁST	2
---------------	----	---------------------	----	-------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato práce se zabývá soustružením superslitin. Jsou zde popsány nástroje, které jsou používané v praxi a druhy chlazení.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Superslitina, soustružení, obrobiteľnosť, řezná destička, chlazení</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Jurčík	Name Jan	
FIELD OF STUDY	B2301 „Department of Machining Technology“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST – KTO		
TYPE OF WORK	BACHELOR	DIPLOMA	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	New trends in construction of tools		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	44	TEXT PART	42	GRAPHICAL PART	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This work deals with the turning of superalloys. They are here descriptions of tools that are used in practice and types of cooling.
KEY WORDS	Superalloys, turning, machinability, cutting plate, cooling

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto chci poděkovat vedoucímu práce Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za poskytování informací a cenných rad během průběhu vypracování bakalářské práce.

Obsah

OBSAH	6
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	7
1 ÚVOD	8
2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	9
2.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ VBD DLE ISO	9
2.2 DRUHY MATERIÁLŮ PRO VBD	9
2.2.1 Slinuté karbidy (SK)	10
2.2.2 Keramické řezné materiály	10
2.2.3 Cermety.....	10
2.2.4 Supertvrdé řezné materiály	10
2.2.5 Druhy materiálů pro VBD v závislosti na skupině obráběného materiálu	10
2.3 POVLAKY VBD	12
2.3.1 Metody povlakování VBD	12
2.3.2 Druhy vrstev pro VBD.....	13
2.4 SYSTÉMY UPÍNÁNÍ VBD.....	14
2.5 ROZDÍLY MEZI NÁSTROJI PRO HRUBOVACÍ A DOKONČOVACÍ OPERACE.....	15
2.5.1 Základní druhy utvařečů VBD s negativní geometrií	16
2.6.1 Základní druhy utvařečů VBD s pozitivní geometrií	17
3 SUPERSLITINY	19
3.1 VLASTNOSTI SUPERSLITIN	19
3.2 DĚLENÍ SUPERSLITIN	20
3.2.1 Superslitiny na bázi železa	20
3.2.2 Superslitiny na bázi kobaltu	21
3.2.3 Superslitiny na bázi niklu.....	21
3.3 SOUSTRUŽENÍ SUPERSLITIN	21
3.3.1 Vhodné nástrojové materiály	22
3.3.2 Geometrie břitu	24
3.3.3 Životnost nástroje.....	26
4 NEJMODERNĚJŠÍ TECHNOLOGIE	28
4.1 SAMOJÍZDNÉ ROTAČNÍ NÁSTROJE (SPRT)	28
4.2 EFEKTIVNÍ DRUHY CHLAZENÍ	29
4.2.1 Vysokotlaké chlazení	31
4.2.2 Minimální množství mazání (MQL)	33
4.2.3 Kryogenní chlazení	35
4.2.4 Vnitřní chlazení.....	36
4.2.4 Vnitřní chlazení nástroji.....	38
5 ZÁVĚR	40
6 POUŽITÁ LITERATURA	41

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Vysvětlení
VBD	vyměnitelná břitová destička
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
SK	slinuté karbidy
TiN	nitrid titanu
TiC	karbid titanu
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
TiCN	karbonitrid titanu
WC	karbid wolframu
TaC	karbid tantalu
CVD	chemická metoda povlakování
PVD	fyzikální metoda povlakování
μm	mikrometr
mm	milimetr
°C	stupeň Celsia
Cr	chrom
Mo	molybden
W	wolfram
Ti	titan
Ta	tantal
Al	hliník
Nb	niob
Fe	železo
C	uhlík
Ni	nikl
Co	kobalt
Cu	měď
SPRT	samojízdné rotační nástroje
HSS	vysokorychlostní oceli
CBN	kubický nitrid boru
Si ₃ N ₄	nitrid křemíku

1 Úvod

Superslitiny jsou těžkoobrobitelné materiály v praxi používané pro jejich mechanické a chemické vlastnosti, které jsou stálé i ve vysokoteplotním prostředí. Bohužel tyto materiály se vyznačují špatnou obrobitelností. Při použití konvenčních metod soustružení je řezný proces neekonomický a neefektivní. Hlavní příčinou je nízká životnost nástroje. Z tohoto důvodu se v současnosti klade důraz na zefektivnění řezného procesu a snížení nákladů potřebných pro obrábění. Zmíněné parametry lze zvýšit použitím vhodné metody obrábění, použitím vhodného nástrojového materiálu a také použitím vhodného druhu chlazení.

V posledních letech se klade velký důraz na ekologičnost výroby. Proto je snaha snížit množství procesních kapalin na minimum anebo se vyhnout jejich použití ve výrobě úplně. Z této snahy plyne další výhoda a to další snížení nákladů výroby.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Základní dělení VBD dle ISO

Pro rozčlenění VBD se používá norma ISO 513, kde je dělen obráběcí materiál na 6 skupin. Tyto skupiny jsou označeny barvou a písmenem. Materiály s nízkým číslem lze obrábět vysokou rychlostí. Na rozdíl od materiálů s číslem vysokým, u kterých roste pevnost, a lze obrábět vyšší rychlostí posuvu.

Nejdůležitější vliv na členění destiček má geometrie destiček. Podle značení se dá odvodit tvar destičky, úhel špičky, tolerance přesnosti tloušťky, provedení, délku řezné hrany, tloušťku, radius špičky, provedení řezné hrany, směr posuvu a typ utvařeče třísky.

ISO - SYSTÉM ZNAČENÍ VYMĚNITELNÝCH BŘITVÝCH DESTIČEK
ISO - SYSTÉM ZNAČENÍ VYMĚNITELNÝCH BŘITVÝCH DESTIČEK

1 Tvar destičky / Tvar destičky

2 Úhel hrany / Úhel špičky

3 Provedení / Provedení

4 Délka řezné hrany / Délka řezné hrany

5 Tloušťka / Hloubka

6 Radius špičky / Radius špičky

7 Kruhové destičky / Kruhové destičky

ISO kód

T	N	U	N	22	04	08			
T	N	M	G	22	04	08	E	N	- M

ANSI kód

1	2	3	4	5A	6A	7A	8	9	10
T	N	U	N	4	3	2	E	N	- M
T	N	M	G	4	3	2	E	N	- M

3 Tolerance / Tolerance

Označení / Označení	Tolerance / Tolerance (mm)			Tolerance / Tolerance (Palce)		
	m (±)	s (±)	d = LC, (±)	m (±)	s (±)	d = LC, (±)
A	0,005	0,025	0,002	0,0002	0,001	0,0010
F	0,005	0,025	0,013	0,0002	0,001	0,0005
C	0,013	0,025	0,025	0,0005	0,001	0,0010
H	0,013	0,025	0,013	0,0005	0,001	0,0005
E	0,025	0,025	0,025	0,0010	0,001	0,0010
G	0,025	0,130	0,025	0,0010	0,005	0,0010
J	0,035	0,025	0,05 + 0,13	0,0002	0,001	0,002 + 0,005
K	0,013	0,025	0,05 + 0,13	0,0005	0,001	0,002 + 0,005
L	0,025	0,025	0,05 + 0,13	0,0010	0,001	0,002 + 0,005
M	0,08 + 0,16	0,130	0,05 + 0,13	0,003 + 0,007	0,005	0,002 + 0,005
N	0,08 + 0,16	0,025	0,05 + 0,13	0,003 + 0,007	0,001	0,002 + 0,005
U	0,05 + 0,38	0,130	0,08 + 0,25	0,005 + 0,015	0,005	0,003 + 0,010

ANSI kód

Upravené třísky / Upravené třísky	Tloušťka / Hloubka	Radius špičky / Radius špičky
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	4	4
5	5	5
6	6	6
7	7	7
8	8	8
9	9	9
10	10	10

8 Provedení řezné hrany / Provedení řezné hrany

9 Směr posuvu / Směr posuvu

10 Úhel / Úhel

Obrázek 2.1 Systém značení VBD [3]

2.2 Druhy materiálů pro VBD

Řezné nástroje mohou být vyrobeny jako monolitní, s pájenými břity nebo s VBD. U nástroje s VBD je tělo vyrobeno z konstrukční oceli, břity jsou vyrobeny ve formě vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu, z řezné keramiky, z rychlořezné oceli, z cermetu, dále z kubického nitridu boru nebo ze syntetického diamantu. [1]

Efektivnost soustružení se mění s velikostí zrn. Odolnost proti opotřebení zajišťují jemná zrna (tzv. submikron). Naproti tomu větší houževnatost zajišťují větší zrna. Pro výrobu VBD, které se používají pro soustružení superslitin jsou vhodnější jemnozrnné materiály, které napomáhají zvýšit již zmíněnou efektivnost. Nástrojový materiál musí splňovat další na

ně kladené nároky, jako je například pevnost v tlaku a stříhu, lomová houževnatost, odolnost proti tepelným rázům a tvrdost. [28]

2.2.1 Slinuté karbidy (SK)

Slinuté karbidy jsou vyráběny slinováním. Vyrábějí se ve tvaru destiček normalizovaných tvarů a rozměrů. Jedná se o směs metalických prášků (wolfram, titan, tantal) a pojiva, kterým je většinou kobalt. Slinuté karbidy mají tvrdost za tepla do 800°C. Z SK se vyrábějí monolitní nástroje např. frézy a vrtáky do průměru 20 mm. Jejich nejčastější využití je ve formě VBD, které se připojují mechanicky nebo pomocí pájení. SK se vyrábějí ve tvaru destiček normalizovaných tvarů a rozměrů.

Mechanicky upínané destičky mají více ostří (hran), které lze otáčením postupně využít. Po otupení všech ostří se již neobnovují (neostří) a nelze je proto dále využívat. [2]

2.2.2 Keramické řezné materiály

Pro jejich výrobu je výchozí surovinou levný a snadno dostupný oxid hlinitý (Al_2O_3). Vyrábějí se práškovou metalurgií, slinováním lisovaných prášků do tvaru řezných destiček. Mají velmi malou pevnost v ohybu, a nejsou proto vhodné k obrábění přerušovaným řezem a k obrábění s většími průřezy třísek. Jejich použití je možné při teplotách řezání až 1 200 °C. Po otupení všech řezných hran se již neostří a dále nepoužívá. [2]

Existují čtyři základní typy řezné keramiky:

- Čistá keramika- - je vytvořena na bázi oxidu hlinitého, kterého obsahuje až 99,9% Al_2O_3 .
- Směsná keramika- je vytvořena na bázi oxidu hlinitého s přísadami TiN a TiC.
- Neoxidická keramika- je vytvořena na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4).
- Vyztužená keramika- obsahuje tzv. whiskery, to je vlákna křemíku o průměru do 1 μm a délce do 100 μm .

2.2.3 Cermety

Vyrábějí se práškovou metalurgií. Mezi cermety se počítají materiály vytvořené na bázi karbidu titanu, karbonitridu titanu (TiCN), nitridu titanu nebo karbidu wolframu (WC). [1]

2.2.4 Supertvrdé řezné materiály

Mezi tyto materiály se řadí monokrystalický diamant, polykrystalický diamant a kubický nitrid boru, který je velmi zajímavý z pohledu obrábění superslitin. Jedná se o nejtvrďší materiály.

2.2.5 Druhy materiálů pro VBD v závislosti na skupině obráběného materiálu

Skupina P – je vhodná pro obrábění uhlíkové oceli a ocelolitiny. Během obrábění vznikají vysoké síly a značně se opotřebovává čelo nástroje. Tato skupina se značuje se modrou barvou. Skupina P obsahuje zvýšené množství TiC a TaC, které zlepšují odolnost opotřebení na čele nástroje.

Tabulka 2.1. Skupina P [3]

D	P01	Ocel, ocelolitina	Jemné soustružení a vyvrtávání - vysoké řezné rychlosti, malé posuvy
----------	-----	-------------------	--

	P10	Ocel, ocelolitina	Soustružení, kopírování, řezání závitů, frézování
	P20	Ocel, ocelolitina, temperovaná litina	Soustružení, kopírování, frézování - střední řezné rychlosti, střední posuvy
	P30		Soustružení, hoblování, frézování - střední až nízké řezné rychlosti, střední posuvy
	P40	Ocel, ocelolitina s pískem a kůrou	Soustružení, hoblování, obrázení, částečně práce na automatech – nízké řezné rychlosti, velké posuvy
	P50	ocel, ocelolitina střední nebo nižší pevnosti	Soustružení, hoblování, obrázení, práce na automatech, nízké řezné rychlosti, velké posuvy
Chemické složení: WC (30-82%) +TiC (8-64%) + Co (5-17%) + TaC.NbC			

Skupina M - Označuje se žlutou barvou. Používá se často na těžké hrubování a přerušované řezy. Je vhodná pro obrábění materiálů, kde vzniká delší tříska (lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli, tvárné litiny). K opotřebení nástroje dochází hlavně vydrolováním ostří.

Tabulka 2.2. Skupina M [3,4]

M	M10	Ocel, manganová ocel, ocelolitina, šedá litina, legovaná litina	Soustružení – střední až vysoké řezné rychlosti, malé až střední posuvy
	M20	Ocel, austenitická a manganová ocel, ocelolitina, šedá a temperovaná litina	Soustružení, frézování, - střední řezné rychlosti, střední posuvy
	M30	Ocel, austenitická ocel, žárovevné materiály, ocelolitina, šedá litina	Soustružení, hoblování, frézování – střední řezné rychlosti, střední až velké posuvy
	M40	Ocel nízké pevnosti, automatová ocel, neželezné kovy a lehké kovy	Soustružení, tvarové soustružení, upichování – zvláště na automatech
Chemické složení: WC (79-84%) +TiC (5-10%) + Co (6-15%) + TaC.NbC (4-7%)			

Skupina K - Označuje se červenou barvou. Používá se pro materiály s dlouho třískou, kde dochází k opotřebení nástroje, a to hlavně obrazí a adhezí. Vhodná pro obrábění litin a neželezných kovů.

Tabulka 2.3. Skupina K [3,4]

K	K01	Kalená ocel, šedá litina s vysokou tvrdostí, keramické látky	Soustružení, jemné vyvrtávání, frézování na čisto, škrábání
	K10	Kalená ocel, šedá a temperovaná litina, slitiny CU a Al, sklo, porcelán, kámen	Soustružení, vrtání, vyhrubování, vystružování, frézování, protahování
	K20	Šedá litina s $HB \leq 220$, měď, mosaz, hliník a ostatní neželezné kovy	Soustružení, hoblování, vyhrubování, vystružování, frézování
	K30	Ocel nízké pevnosti, šedá litina s nízkou tvrdostí	Soustružení, hoblování, obrázení, frézování

K40	Neželezné kovy, měkké a tvrdé dřeva	Soustružení, hoblování, obrázení
Chemické složení: WC (87-92%) + Co (4-12%) + TaC.NbC		

Skupina N – Označuje se zelenou barvou. Používá se pro obrábění neželezných kovů (slitiny hliníku, hořčíku a mědi), plastů a kompozitů.

Tabulka 2.4. Skupina N [3,4]

N	N01	Slitiny hliníku, hořčíku a mědi, plasty, kompozity, tvrdá guma	Dokončovací obrábění
	N05		Střední až těžké soustružení
	N10		
	N25		

Skupina S – Tato skupina je nejvíce zajímavá z pohledu obrábění superslitin. Využívá se pro obrábění superslitin na bázi niklu nebo kobaltu, titanu a jeho slitin nebo na obrábění žáruvzdorných slitin. Skupina S je označena hnědou barvou.

Tabulka 2.5. Skupina S [3,4]

S	S05	Žáruvzdorné slitiny, superslitiny na bázi Ni, slitiny titanu, titan	Dokončovací obrábění v tepelně nepříznivých podmínkách
	S10		Obrábění při nízkých rychlostech
	S25		
	S30		

Skupina H – Je značena černou barvou. Používá se pro obrábění Zušlechtěných ocelí s pevností nad 1500 MPa, kalené oceli, tvrzené kokilové litiny.

Tabulka 2.6. Skupina H [3,4]

H	H01	Kalené a zušlechtěné materiály	Nepřerušované a lehce přerušované obrábění
	H05		Soustružení za nepříznivých pracovních podmínek
	H10		
	H15		
	H25		Soustružení tvrzených materiálů při nízkých řezných rychlostech

2.3 Povlaky VBD

Velký vliv na výsledné vlastnosti VBD má povlak. Tloušťka povlaku se pohybuje v řádech μm , ale i přesto se velmi podílí na trvanlivosti nástroje. Povlak je tvrdý a otěru vzdorný i za vysokých teplot. Použití povlaků zlepšuje odolnost proti opotřebení čela a hřbetu břitu nástroje. Dále umožňuje pracovat za vysokých řezných podmínek, tj. řezné rychlosti a posuvu. Čím je povlak silnější, tím se zvyšuje odolnost destičky proti opotřebení, ale zároveň se zvyšuje k její křehkosti a náchylnosti na odlupování povlaku. [3]

2.3.1 Metody povlakování VBD

Existují dvě základní metody nanášení povlaků, které se používají pro povlakování nástrojů z VBD. Jedná se o metody CVD a PVD. Po provedení výzkumu v nedávné době se projevila metoda PVD jako jako efektivnější oproti metodě CVD.

Metoda CVD se charakterizuje jako chemická metoda, u které probíhá proces povlakování za vysokých teplot v rozmezí teplot 900°C až 1200°C. Využívá se především pro soustružnické nástroje. Touto metodou vznikají větší tloušťky vrstev (do 15µm), které se vyznačují velmi dobrou adhezí na nástrojový materiál. Jednou z hlavních nevýhod je neschopnost napovlakovat ostré hrany nástroje. Aby se zabránilo velkému tepelnému namáhání nástroje během samotného povlakování, tak vznikla odnož této metody, která se nazývá MTCVD.

Metoda PVD se charakterizuje jako fyzikální metoda, u které probíhá proces povlakování u teplot kolem 500°C. Touto metodou vznikají větší tloušťky vrstev (do 6µm). Dále u této metody nevzniká tak velké tepelné namáhání nástroje jako u předešlé metody. Z toho vyplývá, že také nedochází k tak velkému vnitřnímu napětí. Další výhodou této metody je možnost napovlakovat i ostré hrany, které nejdou nanést metodou CVD.

2.3.2 Druhy vrstev pro VBD

V současnosti používané povlaky pro obrábění superslitin jsou popsány v tabulce 2.7.

Tabulka 2.7. Druhy povlaků na nástrojích

Povlak	metoda povlakování
(Ti,Al)N a (Ti)N	PVD
(Ti,C)N + (Al ₂)O ₃ + (Ti)N	CVD
WC/Co + (Ti,Al)N	PVD
(Ti,C)N	MTCVD
(Ti,C)N + (Al ₂)O ₃	CVD
(Ti,Al)N,(Al ₂)O ₃ a (Zr,C)N	PVD
(Ti,C)N + (Al ₂)O ₃	CVD
(Ti,Al)N,(Al ₂)O ₃ a (Zr,C)N	PVD

Povlak (Ti, Al)N je povlak vhodný pro vysokorychlostní operace. S tímto povlakem nástroj získá vyšší otěruvzdornost a vyšší odolnost proti opotřebení. Změnou poměru titanu a hliníku se mění tvrdost povrchu. Na karbidový substrát je nanesena vrstva tloušťky. Na obrázku 2.3 je Povlak (Ti, Al)N s PREMIUMTEC vrstvou na nástroji AH 905 od společnosti Tungaloy. Vrstva má vysoký oxidační odpor. Tloušťka vrstvy na nástroji AH 905 je 1,5µm. Nižší teploty při PVD povlakování zabrání vzniku křehké vrstvy, která je nežádoucí. Dále zajistí stálost tvarů a rozměrů nástroje. Protože je u tohoto nástroje použito houževnatých povlaků, je vhodný pro přerušované řezy. [28]



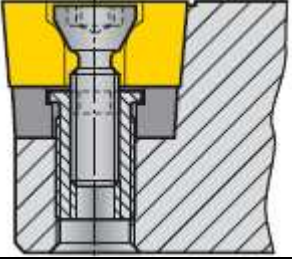
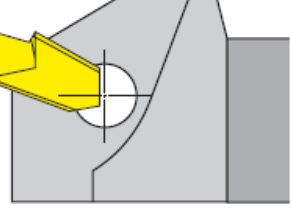
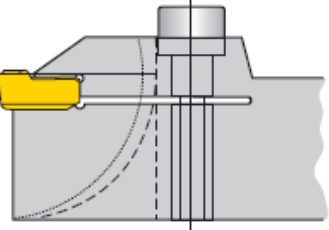
Obrázek 2.3. Povlak (Ti, Al)N s PREMIUMTEC vrstvou od společnosti Tungaloy [28]

2.4 Systémy upínání VBD

Systém upínání VBD musí být dostatečně tuhý, spolehlivý a musí bránit vysunutí VBD z lůžka při obrábění. Upínací mechanismus musí být schopen vyvodit dostatečně velkou upínací sílu a současně nesmí jeho prvky bránit odchodu třísky z místa řezu.

Tabulka 2.8. Systémy upínání VBD [5]

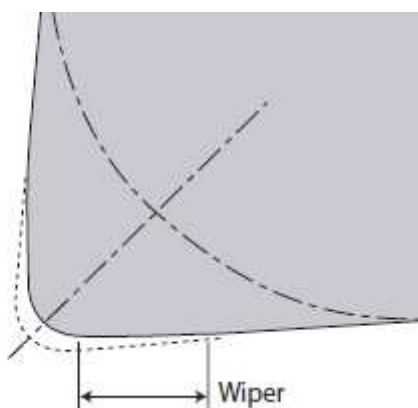
	<p>„Systém ISO P slouží k upínání negativních destiček s válcovým otvorem a to jak s utvařeči tak bez nich. Upnutí destičky je realizováno úhlovou pákou, která po dotažení šroubu dotlačí destičku do lůžka v držáku. Držáky s tímto systémem upnutí VBD zajišťují spolehlivé a přesné upnutí VBD. Jejich nejvýhodnější a také nejčastější použití je pro vnější soustružnické operace a to jak dokončovací tak i hrubovací. Alternativně se tento způsob upínání používá i pro držáky určené pro vnitřní soustružení otvorů větších průměrů.“ [5]</p>
	<p>„Systém ISO M se upínají VBD stejného typu jako u systému ISO P. V tomto případě je destička nasazena na pevný čep, k němuž je dotlačována upínkou, která současně fixuje břitovou destičku i shora. Tento typ upínání je vhodný zejména pro držáky, u nichž se dá předpokládat zvýšené dynamické namáhání. Tyto držáky se používají takřka výhradně pro vnější soustružení.“ [5]</p>
	<p>„Systém ISO C slouží k upínání negativních i pozitivních destiček bez otvoru a to jak s utvařeči (předlisované, vybrušované a příložné) tak bez nich. Destička je v lůžku nožového držáku stabilizována upínkou dotahovanou šroubem, pod níž se u některých typech destiček vkládá ještě příložný utvařeč. Držáky s tímto systémem upínání jsou používány pro obrábění vnějších i vnitřních ploch. Systém upínání C ztrácí v současné době svůj význam. Zejména u nástrojů pro vnitřní soustružení je s výhodou nahrazován systémem S.“ [5]</p>

	„Se systémem ISO S upínání se setkáváme zejména u nožů menších průřezů těles, určených pro vnější i vnitřní soustružení (vyvrtávání). Upnutí je v tomto případě realizováno speciálním šroubem, procházejícím kuželovým otvorem destičky. Dotažením tohoto šroubu je destička fixována v lůžku nožového držáku. Toto řešení je výhodné zejména v tom, že zde není žádná překážka pro odchod třísky.“ [5]
	„Se systémem ISO X se setkáváme s noži s tzv. speciálním systémem upnutí (tzn. je odlišný u jednotlivých výrobců a dodavatelů náradí). V našem případě jsou pod tímto označením uvedeny nožové držáky, které realizují upnutí destičky řeznou silou do samosvorného lůžka. Tento typ upínání se používá pro nástroje určené pro upichování a zapichování.“ [5]
	„Systém ISO G upínání se používá u nožů pro soustružení zápichů a u nožů pro kopírovací soustružení (systém CTP). Destička je do lůžka držáku dotlačována upínkou shora. Dosedací plocha v držáku, v upínce i v destičce je profilována tak, aby se zabránilo vyvrácení destičky posuvovou složkou řezné síly.“ [5]

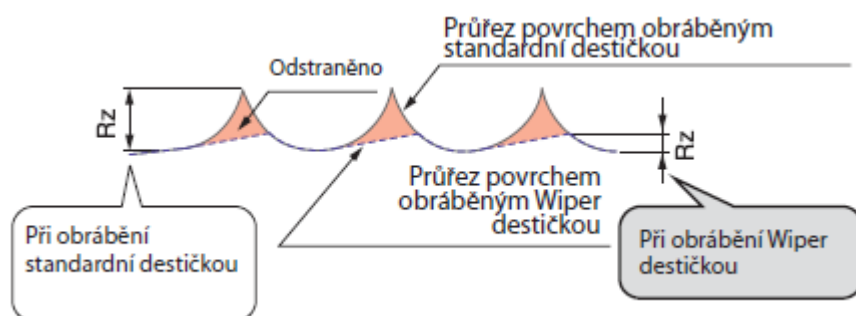
2.5 Rozdíly mezi nástroji pro hrubovací a dokončovací operace

Pro stabilitu soustružnických hrubovacích operací má velký vliv poloměr špičky VBD. Jeho volba ovlivňuje následně velikost posuvu na otáčku a také vlastnosti nástroje, které se projevují při vibracích. Obecné pravidlo pro zvolení správného poloměru špičky je volba co možná největšího poloměru, která dovolí obrábět nástrojem pomocí vyšších posuvů. Také lépe chrání břit před deformacemi. Na druhou stranu příliš velký poloměr špičky generuje vznik nežádoucích vibrací. Základní poučka pro určení efektivního posuvu zní, že zvolený posuv na otáčku by měl být poloviční, než je poloměr špičky. Hrubovací nástroj musí také dobře lámat a odvádět třísky. Nejefektivnější obráběcí proces poskytuje, když se skloubí střední řezná rychlost a vysoký posuv.

U soustružnických dokončovacích operací se klade největší důraz na jakost obráběné plochy. Jakost plochy určují taktéž poloměr špičky nástroje a velikost posuvu. Základní poučka pro určení efektivního posuvu zní, že zvolený posuv na otáčku by měl být třetinový, než je poloměr špičky. V současnosti se také používá pro dokončovací soustružnické operace VBD s geometrií Wiper (obrázek 2.4). Při obrábění touto geometrií si obrobený povrch zachová vysokou kvalitu (obrázek 2.5) při dosažení vysoké efektivity obrábění, protože destička Wiper může až zdvojnásobit rychlost posuvu. [28]



Obrázek 2.4. VBD s geometrií Wiper [28]



Obrázek 2.5. Porovnání drsností profilu [28]

2.5.1 Základní druhy utvařečů VBD s negativní geometrií

V tabulce 2.9 je seznam používaných utvařečů s negativní geometrií pro soustružení niklových superslitin od firmy Tungaloy. Pro každý typ utvařeče je zde zobrazen názorný obrázek s geometrií samotného nástroje se základním přehledem jejich vlastností. V další tabulce 2.10 je zapsáno, pro jaký typ aplikace a pracovní podmínky jsou utvařeče určeny a za jakých posuvů a řezných rychlostí pracují.

Tabulka 2.9. Používané utvařeče s negativní geometrií od firmy Tungaloy [28]

Utvařeč	Vzhled	Vlastnosti
HMM		Utvařeč s nízkou řeznou silou pro superslitiny. Kombinace úzkého pozitivního úhlu a výstupků na čele vytváří malou kontaktní plochu pro třísky, což výrazně snižuje řezné síly.
Bez utvařeče (CBN)		Destičky T-CBN. Dobrý výkon při dokončování žáruvzdorných nebo titanových slitin.
SA		Tento utvařeč je navržen tak, aby snižoval plochu kontaktu mezi nástrojem a třískou, což zabraňuje zvýšení teploty destičky při obrábění.

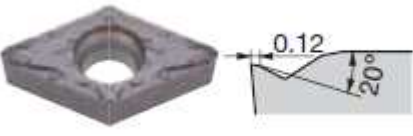
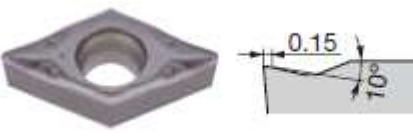

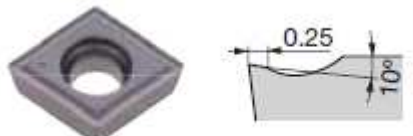
Tabulka 2.10. Aplikace utvařečů [28]

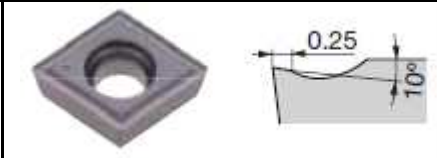



Operace	Pracovní podmínky	Utvařeč	Hloubka řezu a_p (mm)	Posuv f (mm/ot.)	Řezná rychlost V_c (m/min)
Přesné dokončování	souvislé, lehce přerušované	Bez utvařeče (T-CBN)	0.1- 0.3 -0.5	0.05- 0.1 -0.2	70- 200 -300
Dokončování	souvislé, lehce přerušované	HMM	0.5- 1.5 -3.0	0.1- 0.2 -0.3	20- 50 -100 20- 30 -50 10- 20 -40
Střední obrábění	souvislé, lehce přerušované	SA	1.0- 2.0 -4.0	0.2- 0.3 -0.4	- 20- 30 -50 10- 20 -40

2.6.1 Základní druhy utvařečů VBD s pozitivní geometrií

V tabulce 2.11 je seznam používaných utvařečů s pozitivní geometrií pro soustružení niklových superslitin od firmy Tungaloy. Pro každý typ utvařeče je zde zobrazen názorný obrázek s geometrií samotného nástroje s jejich vlastnostmi. V další tabulce 2.12 je zapsáno, pro jaký typ pracovních podmínek jsou utvařeče určeny a za jakých posuvů a řezných rychlostí pracují.

Tabulka 2.11. Používané utvařeče s pozitivní geometrií od firmy Tungaloy [29]

Utvařeč	Vzhled	Vlastnosti
PSF		Pro dokončovací práce s nízkou řeznou silou. Zaručuje vynikající ovládnutí třísek při malých hloubkách řezu.
PSS		Unikátně navržený utvařeč snižuje řezné síly a poskytuje vyjimečnou kontrolu třísek v širokém rozsahu řezných podmínek.
PS		Univerzální utvařeč pro střední soustružení. Speciální tvar a ostré hrany zajišťují vynikající lámání třísek.
ALL-round		Vhodný pro široké spektrum aplikací jak nepřerušovaného tak přerušovaného řezu. Kombinuje ostrot nástroje s vysokou odolností proti vzniku lomu

RS			Kontruován pro kulaté vložky. Umožňuje vynikající lámavost třísek pomocí velkého úhlu čela, který snadno kroutí třísky
61			Kontruován pro kulaté vložky. Vhodné pro střední soustružení s malou hloubkou řezu a vysokým posuvem.

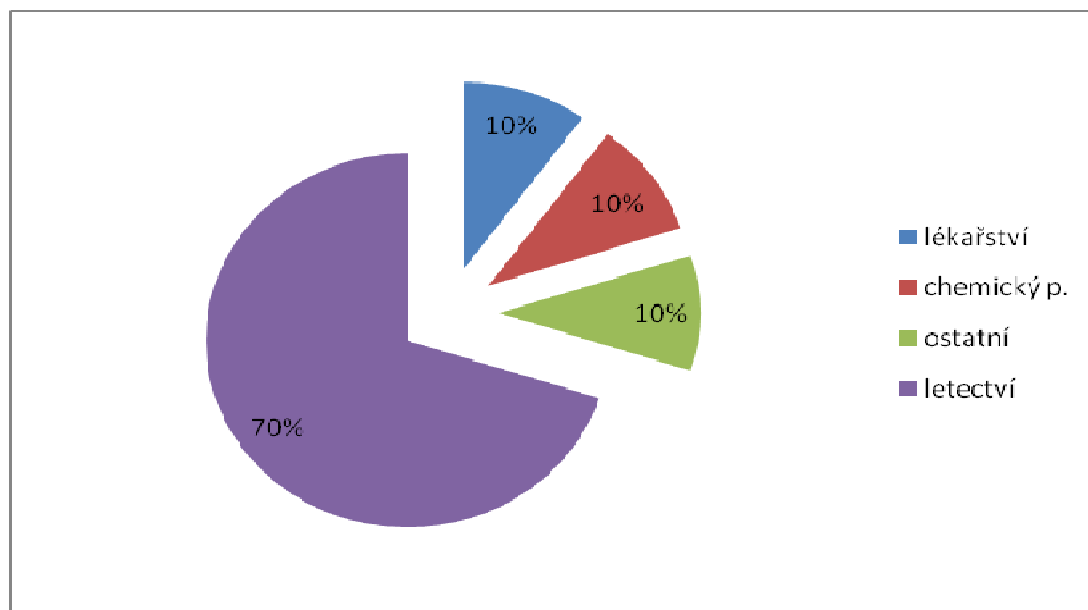
Tabulka 2.12. Aplikace utvařečů [29]

Operace	Utvařeč	Řezná rychlost Vc (m/min)	Hloubka řezu ap (mm)	Posuv f (mm/ot.)
Dokončování	PSF	50 (20-100)	0.3 (0.05 - 0.5)	0.16 (0.02 - 0.3)
Dokončování	PSS		1.0 (0.5 - 2.0)	0.16 (0.02 - 0.3)
Dokončování až střední soustružení	PS		1.0 (0.5 - 2.5)	0.16 (0.02 - 0.3)
Střední soustružení	ALL-round		1.5 (0.5 - 3.0)	0.19 (0.08 - 0.3)
Dokončování	RS		1.0 (0.5 - 1.5)	0.15 (0.03 - 0.3)
Střední soustružení	61		1.0 (0.5 - 2.0)	0.4 (0.2 - 0.6)

3 Superslitiny

Hlavní důvody pro rozšíření Superslitiny byly zvýšené požadavky na materiály, které jsou odolné proti korozi za vysokých teplot. Tyto požadavky jsou i v dnešní době stále aktuální a proto poptávka po těchto materiálech stále pokračuje. Nerezoceli vyvinuté ve druhé dekádě 20. Století sloužili jako výchozí materiál pro uspokojení vysokoteplotních požadavků. Jedná se o teploty nad 650°C. Nejdůležitější výhody superslitin jsou výborné creepové vlastnosti a odolnost proti korozi za zvýšených teplot. Podle složení je lze dělit na legované slitiny na bázi železa, niklu a kobaltu. U těchto slitin jsou hlavními přísadami Cr, Mo, W, Ti, Ta a Al.

Obrázek 3.1 ukazuje, že 2/3 produkce superslitin je spotřebován v leteckém a kosmickém průmyslu pro výrobu proudových motorů a přidružených komponentů. Součásti vyrobené s vysoce legovaných slitin jsou menší a lehčí než v případě, že by byly vyrobeny z konvenční oceli. To má za následek významnou úsporu paliva a snížení znečištění. Každý kilogram hmotnosti, o který se sníží hmotnost letadla, dokáže uspořit obvykle 150 000 dolarů v nákladech na palivo za životnost motoru. Zbývající třetina produkce superslitin se používá chemickém, lékařském a jiných odvětvích, které vyžadují mimořádnou odolnost za vysokých teplot a / nebo výjimečnou korozní odolnost jako například ropná zařízení. [6]



Obrázek 3.1. Spotřeba produkce superslitin

3.1 Vlastnosti superslitin

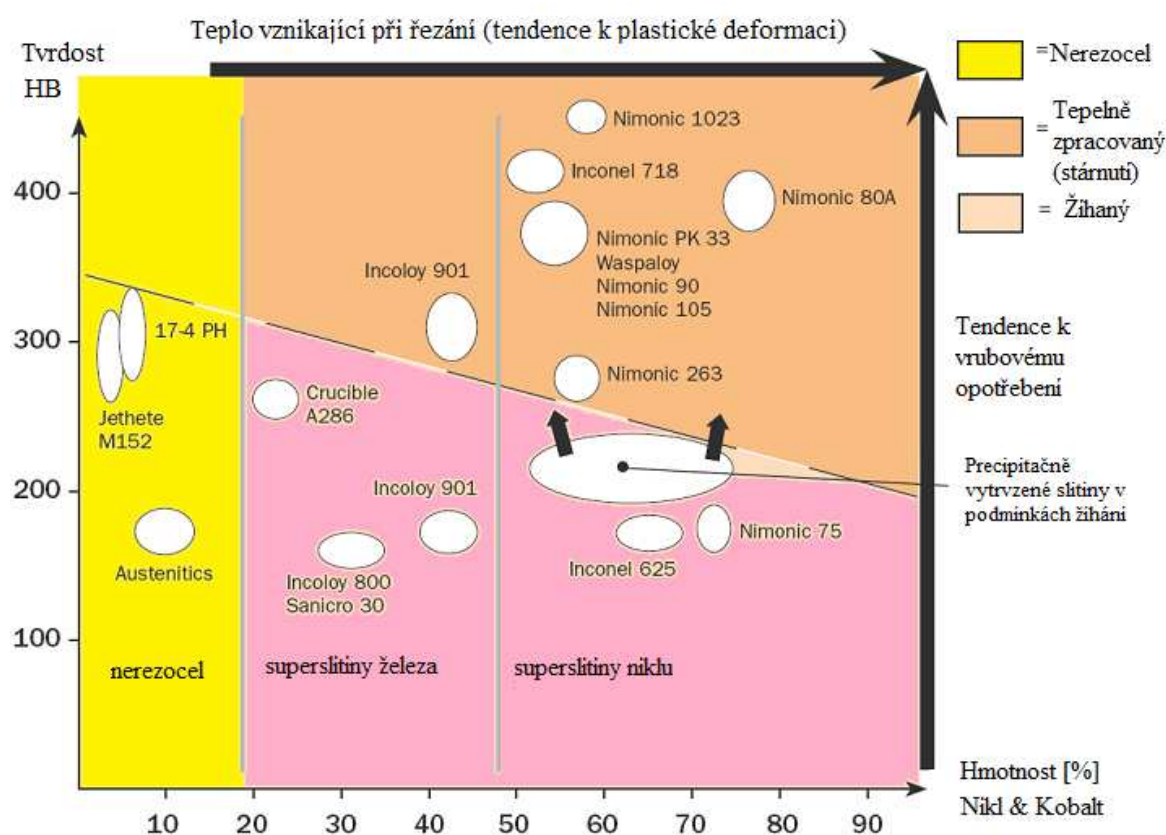
Typické charakteristiky superslitin používaných u leteckých motorů:

- Austenitická matice, která podporuje rychlé zpevnování
- Zachování vysoké úrovně pevnosti při zvýšených teplotách
- Reaktivita s materiálem řezného nástroje při atmosférických podmínkách
- tendence tvořit svary na řezném nástroji
- Přítomnost abrazivních karbidů v jejich mikrostruktuře
- Obecně nízká tepelná vodivost

Tyto vlastnosti způsobují rychlé opotřebení hřbetu, kráterové opotřebení a také způsobuje vznik vrubů na nástroji řezu. Zvýšená pevnost slitin za vysokých teplot zvyšuje síly

na břit během soustružení, které podporují odštípnutí nebo deformaci břitu nástroje. Nízká tepelná vodivost spolu s vysokou pevností materiálu bude generovat velmi vysoké řezné teploty při obrábění. Rychlé zpevnění většiny slitin leteckých motorů během obrábění vytváří tvrdý povrch, který obvykle podporuje vrubování řezného nástroje, takže je obtížné dodržovat přesné tolerance nebo kritickou integritu obráběné součásti. Únavové vlastnosti součásti mohou být ohroženy poškozeným povrchem. To je důvod, proč je velmi důležité vybrat vhodné ostří řezných nástrojů soustružení superslitin. Všechny tyto faktory jasně ukazují, že řezné nástroje jsou namáhány obrovským teplem, tlakem a otěrem při obrábění. [6]

Za účelem dosažení vyšší pevnosti se tepelně odolné slitiny precipitačně vytvrzují pomocí stárnutí. Zpracováním materiálu za zvýšených teplot se ve slitině vytvoří malé částice – precipitáty. Tyto částice se brání pohybu v krystalické struktuře a tím zabraňují deformaci materiálu (obrázek 3.2). [31]



Obrázek 3.2. Obrábitelnost některých superslitin [31]

3.2 Dělení superslitin

Superslitiny se rozdělují podle druhu matrice do tří základních skupin. Jsou to superslitiny na bázi kobaltu, niklu a železa.

3.2.1 Superslitiny na bázi železa

Hlavním prvkem, ze kterého je složená matrice, je železo. Dalšími prvky obsažené v materiálu je Cr a Ni. Superslitiny na bázi železa se legují prvky W, Mo, Co nebo C. U těchto materiálů se využívá precipitačního vytvrzování. Precipitačním vytvrzováním se zvyšuje pevnost superslitiny. To je umožněno legováním prvkem Ti, Nb nebo Al. Mezi představitele superslitin na bázi železa lze zařadit materiály s názvem INCOLOY. [7,8]

3.2.2 Superslitiny na bázi kobaltu

Hlavním prvkem, ze kterého je složená matrice, je kobalt (Co). Dalšími prvky obsažené v materiálu je Cr, W a Ni. Superslitiny na bázi kobaltu se legují Ta, Mo, Ti, Fe a C. Vlastnostmi je kobalt podobný železu, ale má vyšší pevnost, tvrdost a houževnatost. Tento materiál má oproti ostatním superslitinám lepší svařitelnost, vysokou teplotu tavení odolnost proti korozi. Mezi představitele superslitin na bázi kobaltu lze zařadit materiály s názvem HAYNES. [7,8]

3.2.3 Superslitiny na bázi niklu

Hlavním prvkem, ze kterého je složená matrice, je nikl (Ni). Z ekonomických důvodů se přidává do matrice železo. Dalšími prvky obsažené v materiálu je Cr, Ti, Co, Al, Mo a Ni. Superslitiny na bázi niklu jsou žárupevné a vysoce odolné proti korozi. V porovnání s jinými neželeznými slitinami mají vyšší tvrdost a pevnost. Při vysokých teplotách je jejich pevnost a tvrdost vyšší než u ocelí. Proto se využívají pro součásti, které pracují za vysokých teplot (vyšších než 650°C) a je důležité u nich zajistit rozměrovou stálost, odolnost proti mechanickému namáhání a odolnost proti korozi. V praxi se jedná o součásti proudových a raketových motorů (lopatky turbín, hřídele), pístových motorech, atd. Výroba niklových superslitin je nákladná a tváření a obrábění je obtížné. [7,8]

Dělení niklových superslitin do tří základních skupin:

- Slitina Ni-Cu
- Slitina Ni-Cr,Fe
- Slitina Ni-Ti

Některé všeobecně známé niklové superslitiny:

- Nikel slitiny se vyznačují dobrou houževnatostí a odolností proti mechanickému zatížení. Aby se dosáhlo co nejlepší jakosti obrobeného povrchu, tak se slitiny žíhají.
- Nimonic slitina je složena z kobaltu (15 až 20%), chromu (10 až 20%), hliníku, titanu a molybdenu. Nimonic je vhodný do prostředí o teplotách 650 až 860°C.
- Inconel slitina je podobná jako Nimonic. Rozdíl mezi nimi je, že ve složení Inconel je absence kobaltu. Tyto slitiny velmi dobře odolávají korozi i za vysokých teplot, a proto se používají se v leteckém průmyslu.
- Monel slitina je také velmi odolná proti vlivům koroze. Také jí lze přiřadit vysokou pevnost. Tato slitina je složena z mědi (do 32%), křemíku, manganu, železe, hliníku. Z důvodu zlepšení jakosti povrchu a snížení vnitřního pnutí se Monel žíhá.

3.3 Soustružení superslitin

Obrobitelnost je termín používaný k popisu, jak snadno materiál lze obrábět do požadovaného tvaru (povrchová úprava a tolerance). Index obrobitelnosti může být výrazně ovlivněn vlastnostmi obráběného materiálu, vlastnostmi a geometrií řezného nástroje, řeznými podmínkami a dalšími faktory jako je tuhost obráběcího stroje, řezací prostředí, atd. Produktivita obrábění může být výrazně zlepšena správnou kombinací řezných nástrojů, řezných podmínek a obráběcích strojů, které budou podporovat vysokorychlostní obrábění bez ohrožení integrity a tolerancí obráběných součástí. To je zvláště důležité pro ekonomické obrábění obtížně obrobitelné superslitiny. [6]

Značná část vysokých nákladů na obrábění vzniká z důvodu nízkých řezných rychlostí v porovnání s řeznou rychlostí, která se provádí pro ocel. Pro stav povrchu po obrábění hrají důležitou roli mechanické vlastnosti superslitin, zejména v cyklických podmínkách.

Niklové superslitiny jsou obecně kvalifikovány jako materiály se špatnou obrobitelností. Proto se musí přizpůsobit geometrie nástroje. Při obrábění niklových superslitin je snaha zachovat pevnost při vysokých teplotách (kde běžné nástrojové oceli začínají měknout). Další je snaha o zachování neobvykle vysoké dynamické pevnosti ve smyku. Většina z konvekčních prostředků pro zlepšení obrobitelnosti se neuplatní. Úprava slitin a tepelné zpracování nejsou účinné, protože změnami dochází ke změně požadovaných mechanických vlastností. Tabulka 3.1 obsahuje praktický návod pro obrábění superslitin. [7]

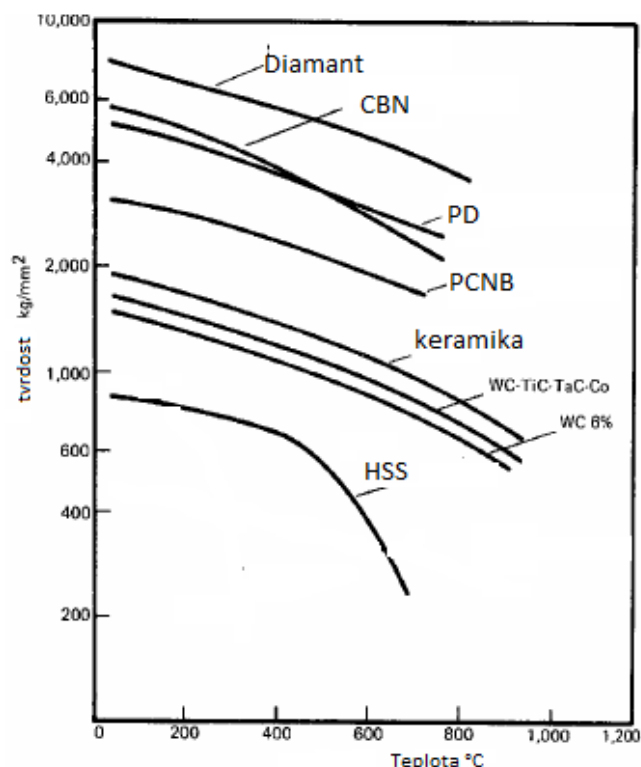
Tabulka 3.1. Praktický návod pro obrábění superslitin [7]

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Obrábění slitiny v nejměkčím možném stavu2. Použití pozitivní geometrie destiček3. Obrábění pomocí relativně ostré hrany4. Použití silné geometrie5. Použití pevného nastavení6. Zabránění částečného průhybu7. Použití vysokého úhlu stoupání8. Je-li zapotřebí více než jeden průchod, měnit hloubku řezu |
|---|

Efektivní a ekonomické obrábění leteckých slitin za vysokorychlostních podmínek vyžaduje dobré pochopení řezných materiálů, řezných podmínek, doby zpracování a funkčnosti obráběného komponentu. Pokroky v oblasti nástrojových materiálů a obráběcí techniky vedly k významnému zvýšení úběru kovu při řezání obtížně obrobitelných superslitin. Tyto slitiny mohou nyní být ekonomicky obráběny při vyšších rychlostech pomocí těchto pokroků. Hlavní vylepšení v obrábění superslitin, zejména v rámci posledních let, jsou metoda SPRT a použití chlazení. [7]

3.3.1 Vhodné nástrojové materiály

Hlavní požadavek řezných nástrojových materiálů používaných pro obrábění leteckých slitin je, že musí mít odpovídající tvrdost. Dále musí odolávat zvýšeným teplotám generovaných při obrábění za vysokých rychlostí a za těchto podmínek si musí udržet svoji tvrdost a chemickou stabilitu. Většina řezných nástrojových materiálů ztratí tvrdost při zvýšených teplotách. To vede k oslabení silové vazby interčástic a následnému zrychlení opotřebení. Teplota změkčení komerčně dostupných řezných nástrojových materiálů používaných pro obrábění slitin leteckých motorů je uvedena v tabulce 3.2. Vliv teploty na tvrdost některých řezných nástrojových materiálů ilustruje obrázek 3.3. Materiál musí mít dále dostatečnou houževnatost, zejména aby nedocházelo k odlamování nástroje během přerušovaného řezu. [6]



Obrázek 3.3. Charakteristiky některých nástrojových materiálů. [6]

Tabulka 3.2. Teplota změkčení komerčně dostupných nástrojových materiálů [7]

materiál	teplota změkčení (°C)
HSS	600
WC	1 100
AL2O3	1 400
CBN	1 500
Diamant	1 500

Běžně používaným řezným materiálem pro superslitiny jsou vysokorychlostní oceli (HSS), karbidy, povlakované karbidy, nitrid boru a keramika. Nejčastěji jsou používané karbidové nástroje, které jsou vhodné pro soustružení. Nejčastěji používaný karbid je podle amerického značení karbid třídy C-2 (> 90% karbid wolframu, zůstatek kobalt). Přidáním 0,5 až 4% karbidu tantalů do wolframo-karbidových nástrojů bylo přínosné pro zlepšení odolnosti proti otěru. Nástroje z karbidu titanu nejsou použitelné pro superslitiny, protože karbid titanu má vysokou rozpustnost v niklu a kobaltu. Některé běžné HSS a slinuté karbidy používané pro obrábění superslitin jsou uvedeny v tabulkách 3.3 a 3.4. Povlakované karbidové nástroje dosud nedokázali zvýšit svoji účinnost odebrání materiálu z niklových superslitin. Omezující je schopnost substrátů odolávat deformaci na podstatně vyšší teplotě obrábění bez ohledu na druhu povlaku použitého materiálu. Kubický nitrid boru je používán pro soustružení tvrdších niklových slitin (kované a lité) a kobaltových slitin. [7]

Tabulka 3.3. Některé HSS nástroje užívané při obrábění superslitin [7]

Typ	Složení (%)						Aplikace
	C	W	Mo	Cr	V	Co	
M6	0,8	4	5	4	1,5	12	těžké obrábění, ořezavzdorná
M30	0,8	2	8	4	1,25	5	těžké obrábění, ořezavzdorná
M33	0,9	1,5	9,6	4	1,15	8	těžké obrábění, ořezavzdorná
M34	0,9	2	8	4	2	8	těžké obrábění, ořezavzdorná
T4	0,75	18		4	1	5	těžké obrábění
T5	0,8	18		4	2	8	těžké obrábění, ořezavzdorná
T6	0,8	20		4,5	1,5	12	těžké obrábění, ořezavzdorná
T15	1,5	12		4	5	5	extrémně ořezavzdorná

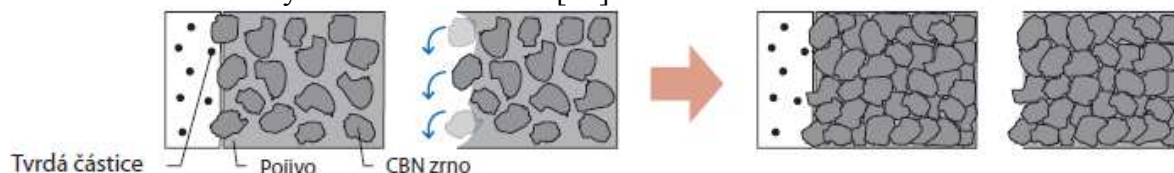
Tabulka 3.4. Používané karbidy pro soustružení superslitin [7]

třída	složení (%)			Pevnost	
	WC	TiC	Co	Mpa	ksi
C-1	94		6	2186	317
C-2	91		9	1379	275
C-3	95,5		4,5	1207	200
C-4	97		3	1482	175
C-6	82	8	10	1207	215
C-50(a)	72	8	8,5		

HSS nástroje se používají při soustružení superslitin v případech přerušovaného řezu. HSS nástroje jsou v takových případech více praktické, protože mají větší odolnost proti nárazům než karbidové nástroje. Jsou také vhodným substrátem pro některé povlaky jako například TiN a (Ti, Al)N. Pracovní podmínky HSS nástrojů jsou ohraničeny teplotou 500°C. [7]

Opatrnou aplikací keramických nástrojů můžeme zvýšit produktivitu, protože tyto nástroje umožňují zvýšit řeznou rychlost při soustružení superslitin. Soustružení s keramikou je ohraničeno teplotou 1 500°C. Při této teplotě je ještě tento materiál chemicky stálý. Vlastnosti keramiky umožňují obrábět superslitiny při vysokých řezných rychlostech a bez použití chladicí kapaliny. Hlavními stavebními kameny pro tyto nástroje jsou oxid hlinitý (Al_2O_3), nitrid křemíku (Si_3N_4) a sialon (směs tvořená z Al, Si, N a O) [7, 9]

CBN nástroje se používají pro dokončovací operace žáravzdorných slitin při soustružení. Jejich použitím lze dosáhnout vysoké jakosti a rozměrové přesnosti obráběné plochy jako při aplikaci broušení. Pro snížení opotřebení vrstvy pojiva je potřeba zvýšit obsah nitridu boru v nástroji (obrázek 3.4), protože pojivo je selektivně obrušováno tvrdými částicemi a dochází k vylamování CBN zrn. [28]



Obrázek 3.4 Vliv obsahu nitridu boru na opotřebení vrstvy pojiva [28]

3.3.2 Geometrie břítu

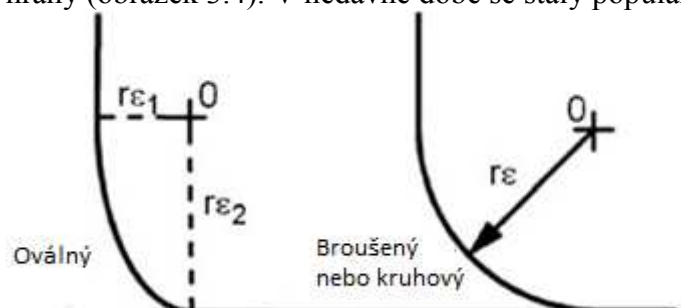
Řezání vysoce legovaných slitin vyžaduje větší síly (asi dvakrát více než je potřebná síla pro řezání uhlíkové oceli v soustružení). Geometrie nástroje, pevnost nástroje a pevnost

upnutí v držáku jsou také důležité. Jak bylo uvedeno dříve, karbidové nástroje jsou používány nejčastěji pro soustružení žáruvzdorných slitin. Ačkoli keramika, nitridu boru a HSS nástroje jsou také používány. Typ C-2 je často vybírán pro hrubování. Typ C-3 je vybírán pro dokončovací operace. Standardní karbidové povrchy s pozitivní nebo negativní geometrií jsou vhodné pro hrubování a dokončování superslitin. Pozitivní geometrie ostří je doporučena pro polodokončovací a dokončovací operace, kdykoliv je to možné z důvodu, aby se materiál obrobku správně odřezával a také aby byl zajištěn dobrý odvod třísky z pracovního prostředí. Pozitivní geometrie minimalizuje zpevňování obráběného povrchu. Použitím negativní geometrie nástroje se materiál obrobku hrne před nástrojem. Doporučené konstrukční úhly nástroje jsou zapsány v tabulce 3.5. [7, 9]

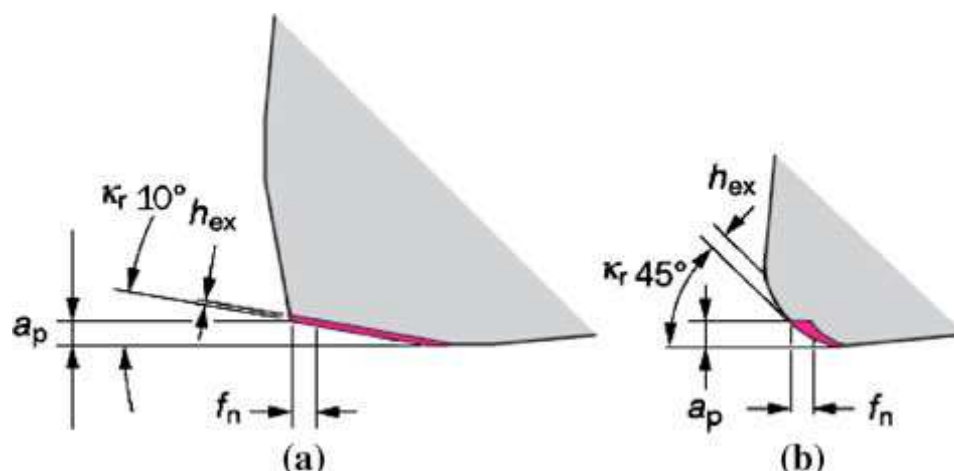
Tabulka 3.5. Doporučená geometrie nástroje [10]

úhel	hrubování	dokončování
úhel hřbetu (α)	0°	8°
úhel čela (γ)	6°	8°
sklon ostří (λ)	6°	8°
úhel ostří (κ_r)	do 45°	do 45°

Úhly a tvar řezné hrany jsou velmi důležité pro úspěšné obrábění. Aby nástroje vydrželi nepříznivé podmínky, které vznikají při soustružení materiálů se špatnou obrobiteľností, jsou jejich břity zkoseny nebo dvojité zkoseny. Úhel zkosení bývá -20° a šířka takového zkosení bývá 0,1 nebo 0,2 mm (obrázek 3.5). Pro souvislé soustružení se používá malý úhel zkosení, protože ten zvyšuje odolnost nástroje proti opotřebení. Na rozdíl od přerušovaného řezu, kde se používá naopak větší úhel zkosení, protože ten zvyšuje odolnost proti vzniku lomu. Tyto nástroje se dále chrání před mikroodlamováním broušením řezné hrany (obrázek 3.4). V nedávné době se staly populární kulaté destičky. [10, 28]



obrázek 3.4. Broušení řezné hrany [10]



obrázek 3.5. Zkosení břitu [10]

Ostré hrany destiček jsou užitečné při prevenci proti nahromadění materiálu. Jsou také užitečné pro zlepšení povrchových úprav při obrábění. Tupé nebo nesprávně zabroušené destičky zvyšují řezné síly při obrábění, což vede k nahromadění materiálu, trhání a průhybu. Je však důležité mít na vědomí, že ostré hrany jsou křehčí a náchylnější k odštípnutí při obrábění. Pro většina hrubovacích operací jsou doporučovány honované hrany. Ostré hrany jsou pak použity pro dokončovací operace. [10]

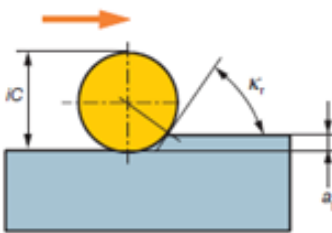
3.3.3 Životnost nástroje

Při obrábění superslitin jsou nejčastější příčiny selhání nástroje vysoké opotřebení boku nástroje, neschopnost splnit požadavky na přesnost a jakost povrchu. Ostatní příčiny jsou zničení ostří a roztavení materiálu. Řezná rychlost je jedním z nejdůležitějších faktorů, který ovlivňuje životnost nástroje při obrábění superslitin. Další faktory ovlivňující životnost jsou materiál obrobku a hloubka řezu. Řezací teploty se při obrábění superslitin pohybují v rozmezí 760°C až 1010°C. U těchto teplot se významně šíří oxidace a také se výrazně opotřebovává nástroj. [11]

Vrubové opotřebení je hlavní problém při obrábění superslitin. Nejhorší opotřebení nastane, když je hloubka řezu větší, než je poloměr špičky a úhel náběhu je 90°. Vznik vrubu nelze nikdy zcela vyloučit, ale po dodržení několika obecných pravidel ho lze kontrolovat. Používejte raději kulaté vložky kdykoliv je to možné. Nepoužít při větším zadání úhlu než 45° nebo 0,15 x průměr. Nejlepšího výkonu je dosaženo, když úhel ostří zůstává pod hranicí 45° nebo 0,15 x průměr a maximální hloubka řezu není větší než 0,25 x průměr. Pro větší hloubky řezu, které jsou větší než 25% průměru, je lepší použít čtvercové destičky s konstantním úhlem ostří 45 [11].

Úběr se mění v závislosti na kruhové destičce a závisí na vstupním úhlu (obrázek 3.6). Díky nízkému poměru hloubky řezu a průměru může být posuv zvýšen za účelem zvýšení tloušťky třísky na požadovanou úroveň.

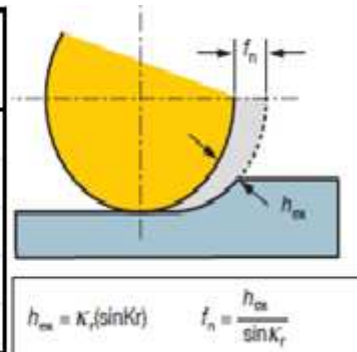
poměr hloubky řezu a průměru	hloubka řezu pro průměr destičky (mm)				úhel ostří (°)
	8	10	12	16	
0,25	2	2,5	3	4	60°
0,2	1,6	2	2,4	3,2	53°
0,15	1,2	1,5	1,8	2,4	46°
0,1	0,8	1	1,2	1,6	37°
0,05	0,4	0,5	0,6	0,8	26°



Obrázek 3.6. Velikost úběru v závislosti na kruhové [11]

Doporučené tloušťka třísky pro superslitiny jsou mezi 0,15 až 0,4 mm pro karbid, a 0,08 až 0,15 mm pro keramiku. Jakákoliv vyšší hodnota by měla za následek opotřebení na břitu destičky. Výpočet posuvu je odvozen z následujícího obrázku (obrázek 3.7). [11]

poměr hloubky řezu a průměru	úhel ostří (κr)	posuv
0,25	60°	1,16
0,2	53°	1,25
0,15	46°	1,4
0,1	37°	1,66
0,05	26°	2,3



Obrázek 3.7. Velikost posuvu v závislosti na destičce [11]

Příklad: 12,7 mm průměr; keramika 670; Hloubka řezu 2 mm umožňuje úhel ostří $\kappa r = 46^\circ$.
Tloušťkou třísky $h_{ex} = 0,12$ mm. Vypočítejte správný posuv v mm/ot. [11]

$$f_n = \frac{h_{ex}}{\sin 46} = \frac{0,12}{0,72} = 0,17 \text{ mm/r} \quad (1)$$

4 Nejmodernější technologie

Protože obrobitelnost superslitin je definována jako špatná, tak se v současnosti klade důraz na moderní technologie a nástroje, které vedou k zefektivnění obrábění. Jednou z cest, jak zvýšit životnost nástroje, je konstruovat kvalitní nástroje. Tomuto tématu byl věnován předešlý text. Obsahem této kapitoly bude vysvětlení, jak lze zvýšit životnost nástroje, řezné rychlosti a ostatní parametry efektivního obrábění pomocí nejmodernějších technologií s ohledem na zachování vlastností obráběného materiálu.

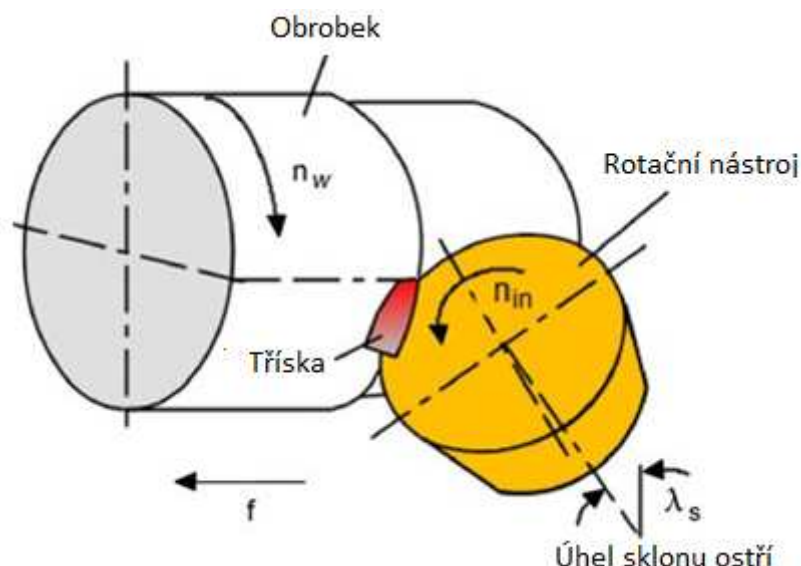
4. 1. Samojízdné rotační nástroje (SPRT)

Jednou z moderních soustružnických metod, jak lze kvalitně obrábět niklové superslitiny, je metoda samozápného rotačního nástroje. Pohyb ostří kromě hlavního rotačního pohybu a posuvu je hlavní rozdíl mezi rotačním obráběním a konvenčním obráběním (obrázek 4.2). Další pohyb rotačních nástrojů zajišťuje, že část břitu nástroje se podílí na obráběcí operaci po velmi krátkou dobu, po které následuje prodloužení doby odpočinku, která umožní vedení tepelné energie od oblasti obrábění. Rotace nástroje je zvýšena buď externím ovladačem nebo samohybným účinkem řezné síly (pro SPRT) působící na nástroj úpravou sklonu své osy s ohledem na rychlost řezání. Při obrábění metodou SPRT se využívá kulaté destičky rotující nepřetržitě kolem své osy (obrázek 4.1).



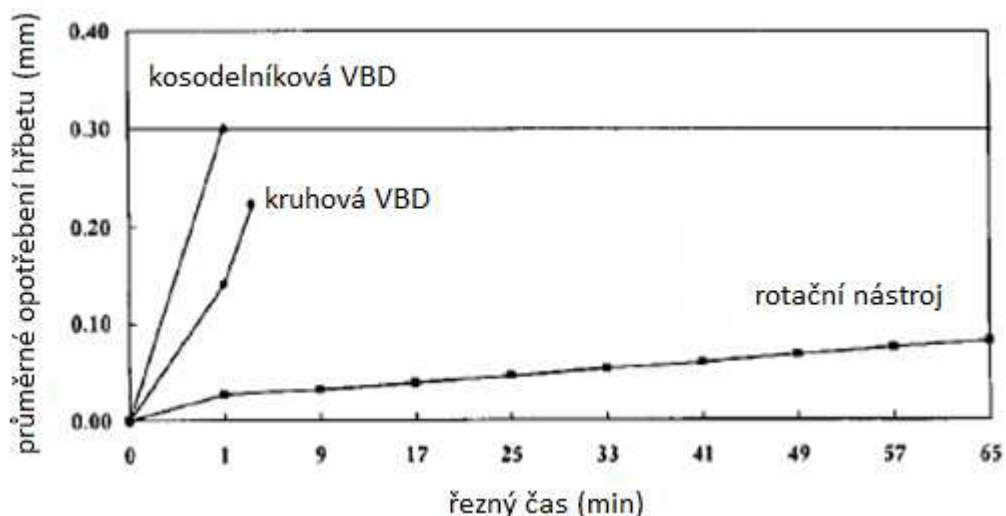
Obrázek 4.1. Rotační nástroj pro SPRT [10]

U této metody nejsou kladeny na nástroj tak vysoké požadavky jako pro nástroje používaných u konvenčního soustružení, protože dochází k mnohem menší době styku obráběcího nástroje a obrobku. Nástroj během rotačního obrábění dovolí vedení minimálního množství energie do obráběné součásti. Tím se minimalizuje povrchové tepelné namáhání během obrábění. Z těchto výhod plyne, že rotační nástroje mohou pracovat s mnohem vyšší řeznou rychlostí a posuvem při obrábění leteckých slitin vzhledem ke konvenčnímu způsobu. [6]



Obrázek 4.2. Princip SPRT [10]

U této metody obrábění je nástroj zatížen nižší řeznou teplotou až o 200 °C než u nerotujícího nástroje v důsledku snížení práce, která koná deformaci a tření povrchu nástroje. Dále se při obrábění zaměstnává celý okraj kulaté vložky. To má za následek snížení rychlosti opotřebení. Posun řezná hrany rotačního nástroje výrazně sníží dobu kontaktu soustavu nástroj-obrobek. [6]



Obrázek 4.3. Porovnání opotřebení při obrábění pomocí různých řezných nástrojů při posuvu 0,25 mm/rev a řezné rychlosti 89 m/min. [6]

4.2 Efektivní druhy chlazení

Jak již bylo jednou zmíněno, použitím chlazení při soustružení superslitin lze zvýšit životnost nástroje, řeznou rychlost, posuv a ostatní parametry. Dále se zvyšuje jakost a rozměrová přesnost obrobenej plochy. Tím se zefektivní obrábění s ohledem na zachování vlastností obráběného materiálu. Důležité je správně určit složení a množství kapaliny a její neefektivnější přívod.

Během soustružení vzniká v místě řezu teplo, které značně ovlivňuje trvanlivost nástroje, rozměrovou přesnost obráběnej plochy atd. Proto se používá ke snížení tepla řezných kapalin. Její chladicí účinek odvádí teplo z řezu a zároveň zajišťuje snížení na optimální

teplotu během řezání. Při kontaktu řezné kapaliny a povrchu obrobku přestoupí teplo z teplejšího obrobku do chladnější řezné kapaliny. Poté kapalina odvede přenesené teplo mimo prostor obrábění. Významné zesílení chladicího účinku je dosaženo tím, že se zvýší rychlost proudění, a tak se zvýší součinitel přestupu tepla. [12]

-Tepelná bilance řezného pohybu: [12]

$$Q_C = Q_{PD} + Q_\gamma + Q_\alpha \quad (2)$$

Q_{PD} – teplo, které vzniklo plastickými deformacemi během tvoření třísky

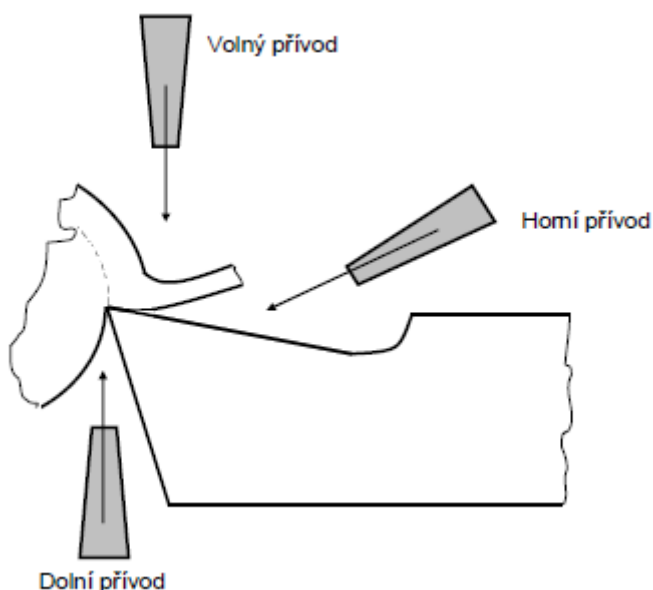
Q_γ – teplo, které odvedl obrobek

Q_α – teplo, které odvedl nástroj

Řezná kapalina má i jiné funkce, mezi které patří snížení tření mezi třískou a čelem nástroje a ke snížení třecích sil mezi hřbetem nástroje a obráběným materiálem. Velikost snížení třecích sil je dána viskozitou řezné kapaliny. Také závisí na pracovních teplotách, protože mezi 300°C až 1000°C se nevytváří vrstva ochranného filmu. Pro zvýšení účinnosti této funkce se může změnit chemické složení, ale nevýhodou je nákladná regenerace nebo likvidace takových kapalin. Při zvýšení účinnosti spotřebovává stroj menší množství energie a zároveň se zlepšuje jakost obrobeného povrchu. Další funkcí řezných kapalin je čistící účinek. Myslí se tím, že při obrábění odstraňuje řezná kapalina třísku z místa řezu. [12]

Pro soustružení superslitin se nejčastěji používá voda ředitelný olej ve směsi s jedním dílem oleje na 20 až 40 dílů vody. Chemická emulze na vodní bázi se rovněž ukázala jako přijatelná. Sulfurized nebo chlorované řezné oleje se aplikují přímo nebo zředěný v poměru 1:1 s nízkoviskózním minerálním olejem. Zředěný minerální olej zajišťuje lepší mobilitu (pohyblivost) a chlazení bez vážného zhoršení vlastností těchto chemicky aktivních olejů. Chemicky aktivní řezný olej má přednost před rozpustným olejem pokud jsou povrchové úpravy důležité a jsou používány nástroje pro HSS obrábění. Často důležitější než samotné složení řezné kapaliny je její dodávání do oblasti obrábění. [7]

Řezná kapalina se může dostat do pracovního prostředí několika způsoby. Podle těchto způsobů se následně dělí metody chlazení. Jako základní lze použít dělení na vnější chlazení a vnitřní chlazení. U vnějšího chlazení se dopravuje řezné medium do řezného prostředí pomocí trysky (obrázek 4.4). U vnitřního chlazení se dopravuje řezné medium do pracovního prostoru tělem nástroje (obrázek 4.5).



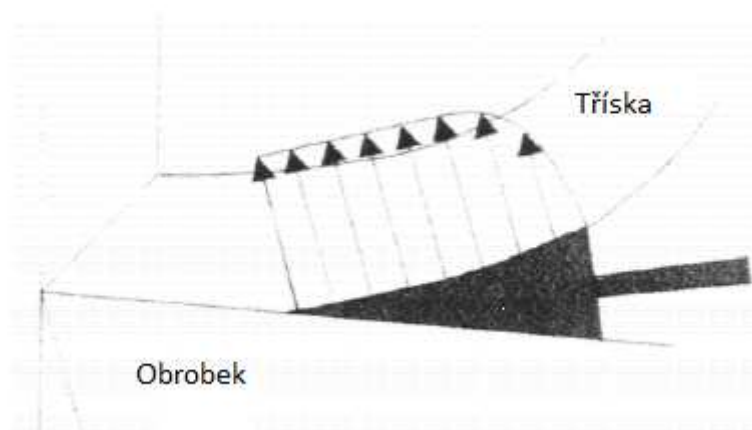
Obrázek 4.4. Přívod řezné kapaliny do řezného prostředí



Obrázek 4.5. Přívod řezné kapaliny do řezného prostředí tělem nástroje

4.2.1 Vysokotlaké chlazení

Myšlenka dodávat kapalinu pod vysokým tlakem (0,3 až 3 MPa) na oblast řezání s cílem zvýšit životnost nástroje při obrábění začalo na počátku roku 1950. Hlavním cílem této obráběcí techniky je výrazně snížit teplotu generovanou na soustavě nástroj-obrobek a soustavě nástroj-tříška při řezání při vyšších rychlostech. Toho je dosaženo tím, že se kapalina nasměruje pod vysokým tlakem na soustavu tříška-nástroj zespodu (obrázek 4.6). Průtokové množství kapaliny se pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 litry za minutu. Tento proces také pomáhá nástroji dosáhnout vysoké schopnosti lámání. Chlazení řezného prostředí účinně snižuje řezací teplotu při obrábění za nižších otáček, kde jsou generovány relativně nízké řezací teploty. Chladicí kapalina působí také jako mazivo, čímž se minimalizuje tření. Všechny tyto vlastnosti snižují tepelné a mechanické namáhání nástroje. [6]



Obrázek 4.6. Chladicí tryska je schopna vytvořit hydraulický paprsek. [6]

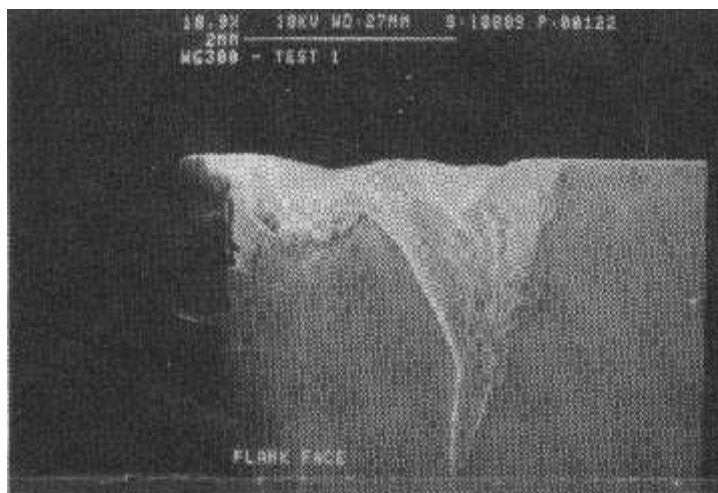
Schopnost dodávat chladicí kapalinu pod vysokým tlakem může zlepšit obrábělnost při vyšších rychlostech. Důvěryhodnost této techniky chlazení byla podrobně zkoumána v průběhu několik let. Zpočátku tato technika byla nepopulární kvůli nákladům na zařízení a příliš nízké rychlosti obrábění. Vysoká rychlost chladicí kapaliny prochází povrch rychleji, a tím výrazně snižuje působení chladiva na oblast řezání. To následně minimalizuje přenos

tepla do řezného nástroje. Vysoký tlak chladicí kapaliny vytváří hydraulický klín mezi nástrojem a obrobkem. Pronikání vysoce energetického paprsku do nástroje třískou snižuje teplotu. Dále nabízí dostatečné mazání v soustavě tříska-nástroj s významným snížením tření. Zlepšení životnosti nástrojů může být dosaženo při obrábění slitiny na bázi niklu (Inconel 718) s povlakovaným nástrojem z karbidu rychlostí do 50 m / min (tabulka 4.1) pomocí vysokotlakého chlazení. [6]

Tabulka 4.1. Procentové zvýšení životnosti nástrojů po obrábění Inconel 718 karbidovým nástrojem [6]

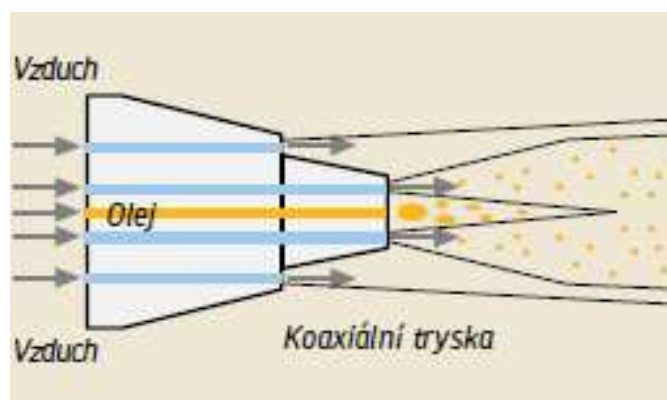
Řezná rychlost (m/min)	Posuv (mm/rev)	Tlak 110 bar	150 bar	203 bar
20	0.25	8	9.8	-33.8
30	0.25	87.7	50.6	64.1
50	0.25	335.0	411.1	462.8
20	0.3	8.6	11.5	-43.9
30	0.3	27.5	95.2	104.5
50	0.3	517.6	647.2	739.8

Nižší životnost byla zaznamenána při obrábění pomocí keramického nástroje (Tabulka 4.2) s vysokotlakým chlazením. Rychlé selhání keramických nástrojů při obrábění s vyšším tlakem chladicí kapaliny a při vyšších rychlostech řezání může být spojeno s významným snížením délky kontaktu soustavy tříska-nástroj. Toto snížení má zanedbatelný vliv na řezné síly, což vede k vyššímu tlakovému namáhání břitu, který má poté tendenci ke zrychlení tvorbě vrubů a / nebo zlomení nástroje během obrábění (obrázek 4.7). Keramické nástroje jsou více náchylné k selhání mechanickým působením. [6]



Obrázek 4.7. Vrub u keramického nástroje po obrábění Inconel 901. [6]

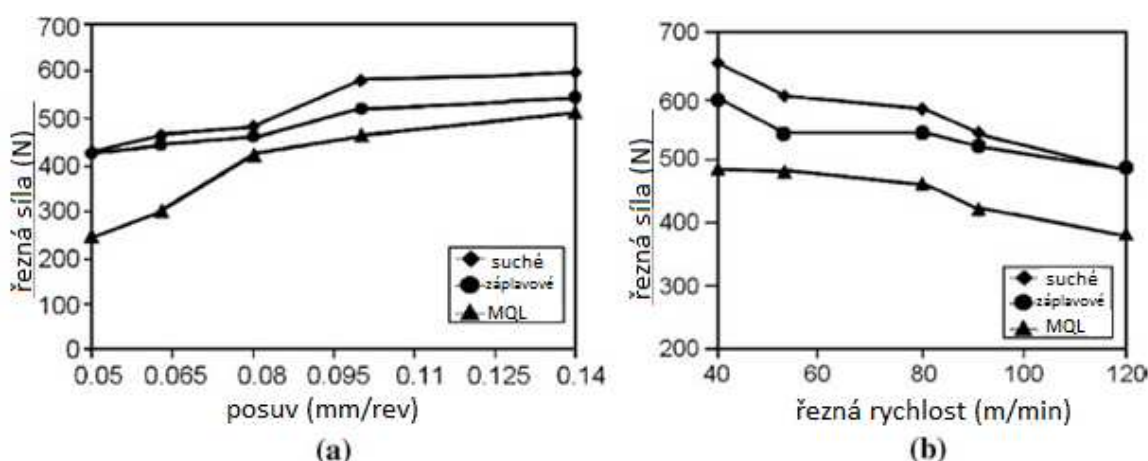
nenáročná. Aplikací MQL se výrazně zvyšuje životnost nástroje, protože mazací směs je dopravována na nástroj a snižuje na jeho povrchu teplotu a tření. Také se zlepšuje jakost obrobeneho povrchu. Samotné zařízení se skládá z nádržky, ve které je uchovávan olej, jedné nebo více trysek a čerpadla, který vpouští stanovené množství oleje do trysky. [13, 14]



Obrázek 4.9. Princip MQL [13]

Dobré výsledky byly pozorovány v oblasti broušení, frézování a soustružení. Tato zlepšení v obrábění lze přičíst mazacímu oleji, který byl schopen se dostat velmi blízko soustavě nástroj-trýska-obrobek pod tlakem. Proto dochází ke snížení tření a síl vznikajících při obrábění. Významné množství tepla se absorbuje do maziva, které se následně odpaří. To přispívá k významnému snížení teploty v pracovním prostředí. Hlavní nevýhodou použití této metody je vznik mlhy, která představuje riziko pro zdraví obsluhy stroje. Toto nebezpečí však lze minimalizovat s kvalitními odsávací mlhy. [6]

Bylo zjištěno, že při chlazení metodou MQL vznikají menší řezné síly v porovnání se suchým obráběním a konvenční metodou chlazení (obrázek 4.10). Je to přičítáno sníženému tření v soustavě nástroj-trýska. Další výhodou metody je, že pomáhá nástroji lámat třísky na kratší kusy. [15]

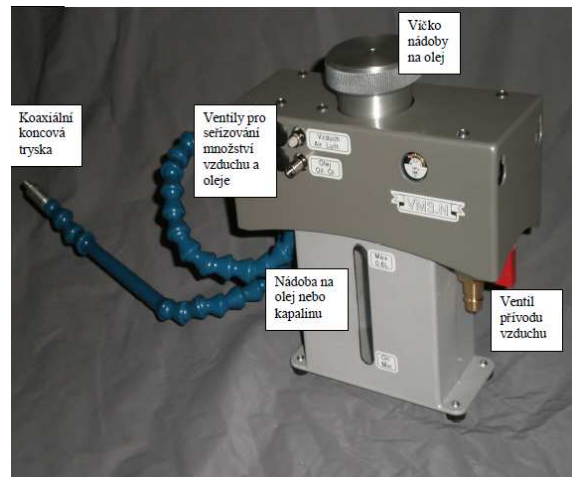


Obrázek 4.10. Snížení řezných sil [15]

Existují tři základní principy tvorby aerosolu. Zařízení, která reprezentují tyto principy, jsou pojmenovány jako VM1, VM2 a VM3. Pro soustružení jsou vhodné zařízení VM2 a VM3 (obrázek 4.11 a 4.12).



Obrázek 4.11. VM3 od firmy VMsystem [16]



Obrázek 4.12. VM3 firmy VMsystem [17]

4.2.3 Kryogenní chlazení

Kryogenní chlazení je účinný způsob, jak udržet teplotu v místě řezu tak, aby nedošlo ke změkčení nástroje. Princip kryogenního chlazení zahrnuje řízení paprsku zkapalněných plynů pod tlakem do obráběné oblasti (obrázek 4.13). Jednou z mnoha metod, jak dopravit chladící medium do pracovního prostředí, je doprava pomocí mikrotrysky před utvařeč třísky na čelo nástroje. Druhá mikrotryska dopravuje medium na ostří. Tím se výrazně zvýší tvrdost, životnost (dochází až k pětinasobnému zvýšení životnosti) a také odolnost proti opotřebení. Experimentálně bylo zjištěno, že při chlazení nástroje a obrobku zároveň se dosahuje nejlepších výsledků. [6, 15]



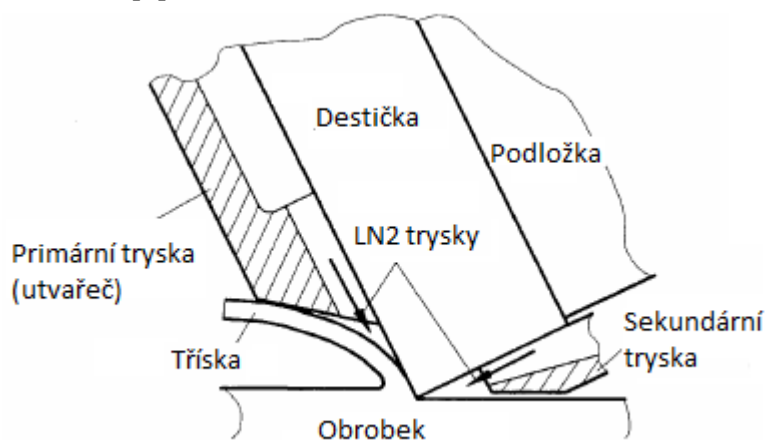
Obrázek 4.13. Nástroj s kryogenním chlazením [18]

Běžně se používá jako chladicí kapaliny tekutý dusík (LN2), protože jeho pořizovací náklady jsou nízké. Také nepoškozuje životní prostředí. Také lze ovšem použít tekutý kysličník uhličitý ve formě tryskaného sněhu (obrázek 4.14).



Obrázek 4.14. Kryogenní chlazení kysličníkem uhličitým [19]

Lepší výkon obrábění měl nástroj se systémem chlazení LN2. Dále bylo v soustružnických operacích zjištěno, že směřováním paprsku chladicí kapaliny LN2 přímo na oblast řezání zvýšilo výrazně výkon (obrázek 4.15). Během kryogenní obrábění jsou generovány vyšší síly než při konvenčním nebo suchém obrábění. Tato anomálie je přičítána skutečnosti, že dílčí teploty mají za následek zvýšení tvrdosti a pevnosti pracovního materiálu. [6]



Obrázek 4.15. Systém dvou trysek pro lokální zásobování LN2 [6]

4.2.4 Vnitřní chlazení

Použitím vnitřního chlazení se mění konstrukce nástroje, protože řezná kapalina se dopravuje tělem nástroje. Proto je nutné, aby v nástroji byly vytvořeny kanálky, které to umožňují. Také se musí zvážit počet a umístění koncových trysek a jejich směřování na břit nástroje. Tímto problémem se v praxi zabývá mnoho firem, které se na to specializují.

Vnitřní chlazení se používá v praxi, protože jeho pomocí dochází ke zvýšení efektivity obrábění. Další výhodou je možnost zvýšit řeznou rychlost v rozsahu 5 až 25 %. Tato metoda je především určena pro soustružení s VBD ze slinutých karbidů. Chladicí kapalina je přiváděna na

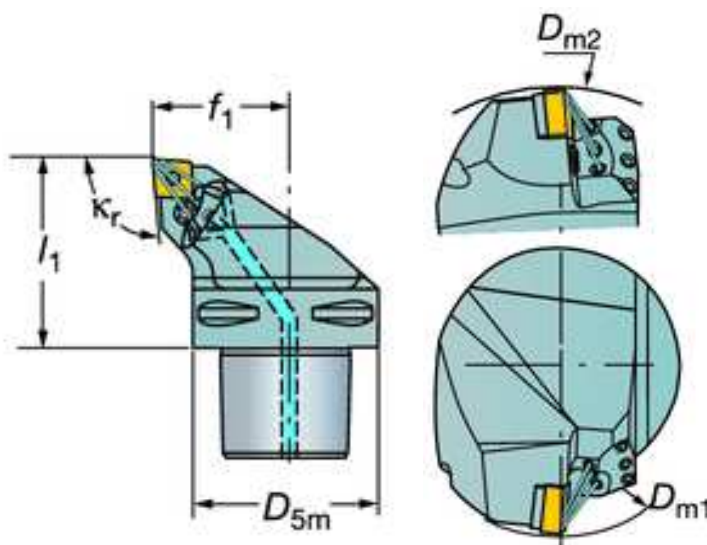
břit nástroje tlakem 6 až 8 MPa. Proudem řezné kapaliny je zajištěno lokální chlazení v místě, kde dochází ke kontaktu mezi nástrojem a obrobkem. Proud kapaliny dále rychle odvádí třísky z pracovního prostředí a zároveň je láme na menší rozměry. Z těchto důvodů se snižuje opotřebení a zároveň se zvyšuje životnost nástroje. [20, 21]

Jedním z představitelů, který vyrábí na trh nástroje s vnitřním chlazením, je firma SECO se svým produktem Jetstream Tooling (obrázek 4.16). Tento nástroj je konstruován pro splnění všech výše zmíněných požadavků efektivního obrábění. Trysky směřují proud kapaliny přímo do místa řezu, kde ochlazují břit a láme třísky, které následně odvádí z místa řezu. Jetstream Tooling je určen pro hrubování superslitin používaných v leteckém průmyslu. Použitím Jetstream Tooling je zvýšena životnost nástroje o 60% i po zvýšení řezné rychlosti o 120%. [22, 23]

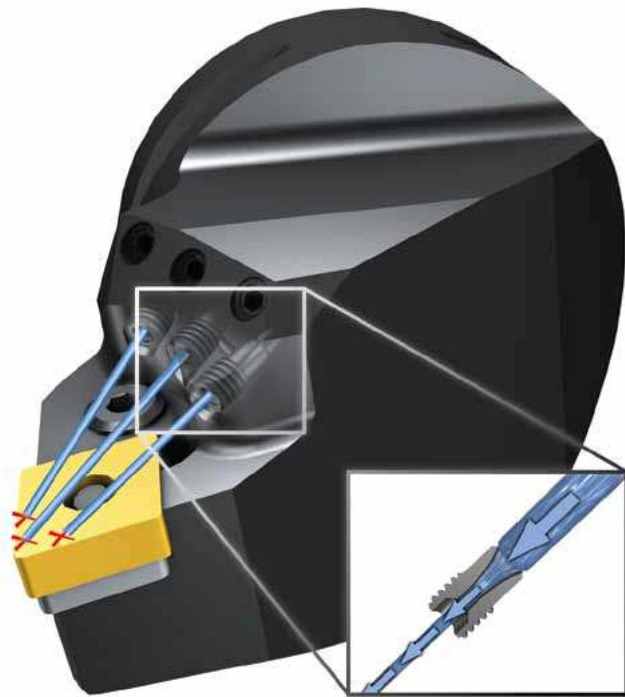


Obrázek 4.16. Produkt Jetstream Tooling od firmy SECO [22]

Dalším představitelem dodávajícím na trh nástroje s vnitřním rozvodem chladicí kapaliny je firma Sandvik Coromant s produkty CoroTurn HP s upínacím systémem CoromantCapto (obrázek 4.17 a 4.18).



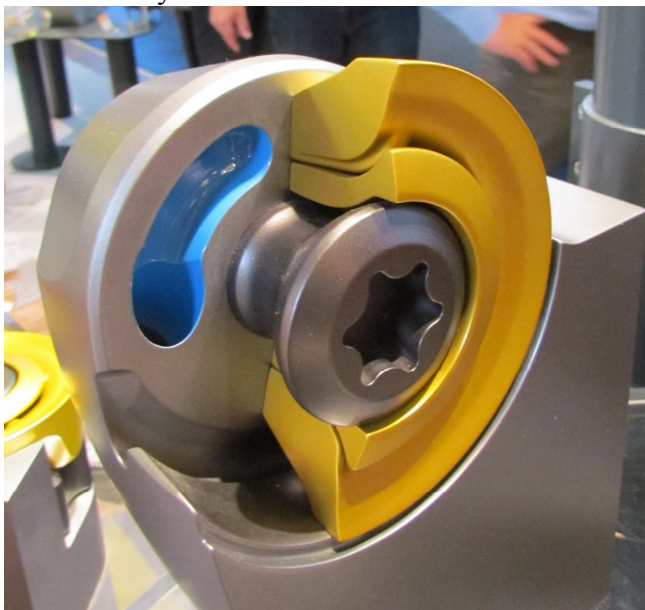
Obrázek 4.17. CoroTurn HP s upínacím systémem CoromantCapto s pohledem na konstrukci kanálků a směřováním proudu kapaliny na VBD [24]



Obrázek 4.18. CoroTurn HP s upínacím systémem CoromantCapto s detailem na průřez trysky [24]

4.2.4 Vnitřní chlazení nástroji

V současnosti existuje zcela odlišný přístup k obrábění vysokoteplotních slitin. Bylo zjištěno, že dalším z efektivních způsobů jak dopravit chladicí kapalinu bude nasměrovat ji skrz tělo destičky (obrázek 4.19). Tím se zlepší tepelná regulace a bude zajištěn dobrý odvod třísek z místa řezu při obrábění leteckých slitin. Tímto způsobem lze následně zajistit, aby se proud kapaliny nasměroval přesně do míst, kde je její nejvyšší využití. Jedním z vedlejších efektů metody je snížení nákladů, které by bylo potřeba investovat do vysokotlakých chladicích systémů.



Obrázek 4.19. Konstrukce destičky chlazené tělem destičky

Jedním z představitelů zaměřujících se na výrobu nástrojů s vnitřním chlazením destiček je společnost Kennametal. Jejich Produkt Beyond Blast (obrázek 4.20) je přímo konstruován pro hospodárné soustružení superslitin. Chladicí kapalina je směřována přes destičku přímo na místo, kde nástroj řeže materiál. Tím je zvýšena efektivnost dodávky chladicí kapaliny a z toho plynoucí zvýšení řezného výkonu, přenosu tepla, mazivosti a odvodu třísek. S tímto produktem lze dosáhnout zvýšení životnosti o 100% a produktivity obrábění až o 25%. [30]



Obrázek 4.20. Konstrukce nástroje chlazeného tělem destičky

5 Závěr

I přes ekonomickou náročnost výroby součástí ze superslitin se budou tyto materiály nadále používat v kosmickém a leteckém průmyslu pro jejich vlastnosti, které nelze nahradit jinými materiály. V současnosti existují společnosti, které si tento fakt uvědomili, a proto se převážně zabývají obráběním superslitin. Z důvodu nízké hmotnosti součástí budou prvotní vysoké náklady navraceny, protože stroje jsou méně energeticky náročné.

Procesní kapaliny se používají v současnosti při obrábění těžkoobrobitelných materiálů pro výrazné zvýšení životnosti nástroje a výraznému zlepšení povrchu obrobku. Dále lze procesní kapaliny používat u součástí s vysokou rozměrovou přesností, které by nešlo docílit při soustružení v suchém prostředí. Další důvodem pro použití technologie chlazení je fakt, že proudem procesní kapaliny dochází k lepšímu odvodu třísky a tepla z pracovního prostředí.

V současnosti se klade velký důraz na ekologičnost výroby. Proto je snaha výrobců používat méně závadné procesní kapaliny nebo jejich používání snížit či úplně zastavit. Toho lze docílit použitím nejmodernějších technologií a postupů. Jak již v práci bylo popsáno, v praxi se používají metody SPRT, MQL a další metody, které snižují spotřebu chladicí kapaliny a tím zároveň snižují výrobní náklady bez toho, aby došlo ke zhoršení jakosti obrobku. Dalším způsobem jak zajistit ekologičnost výroby je vývojem vhodné konstrukce nástroje, která zvýší jeho životnost a zároveň umožní obrábění v efektivních podmínkách. Proto výrobci vyvíjejí nástroje speciálně konstruované pro různé druhy soustružení tak, aby zajistili dobrou životnost a jakost obrobené plochy za co možná již zmíněných nejefektivnějších podmínek obrábění. Konstrukce nástroje se mění s ohledem na použitý nástrojový materiál a druh soustružnické operace, které bude nástroj vystaven.

6 Použitá literatura

- [1] ŘASA, J., V. HANĚK a J. KAFKA. Strojírenská technologie 4: Návrhy nástrojů, přípravků a měřidel. Zásady montáže. 1. vyd. Praha: Scientia, 2003, 505 s. ISBN 80-718-3284-7.
- [2] HLUCHÝ, M., HANĚK, V. Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001, 176 s. ISBN 80-718-3245-6.
- [3] PRAMET. *Soustružení: katalog 2012*. PRAMET TOOLS, s. r. o., 2012. Dostupné z: <<http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Turning%202012%20CZ%20PROG.pdf>>.
- [4] HUMÁR, A. TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia [online]. VUT – FSI v Brně, ÚST, 2003 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [5] PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Příručka obrábění 2004*. Dostupné z: <http://www.mavslovakia.sk/pdf/pramet/prirucka_cz.pdf>.
- [6] EZUGWU, E., O. High Speed Machining of Aero-Engine Alloys [online]. 2004 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-58782004000100001&script=sci_arttext
- [7] DONACHIE, M. J., DONACHIE, S. J.: *Superalloys – A Technical Guide*, Materials Park :ASM International, 2002. 2nd ed. x, 437 s. ISBN 0-87170- 749-7
- [8] SKÁLOVÁ, J., J. KOUTSKÝ a J. MOTYČKA. *Nauka v materiálech*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-417-0.
- [9] SLABÝ, Ondřej. *Název: Sestavení technologie rotační součásti z materiálu Inconel v podmínkách firmy Frencken Brno*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 33 s., 2 přílohy. Vedoucí práce: Ing. Milan Kalivoda. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17059
- [10] DAVIM, J. *Machining of hard materials*. London: Springer, 2011, xii, 211 s. ISBN 978-1-84996-449-4.
- [11] *Coromant.sandvik.com. High pressure coolant machining: for better productivity and results [online]*. 2010. vyd. 48 s. [cit. 2013-11-05]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/en-gb/c-1040-091.pdf>
- [12] ASTAKHOV, Viktor P. *Tribology of metal cutting*. San Diego, CA: Elsevier, 2006, 425 s. ISBN 978-044-4528-810.
- [13] *MM Průmyslové spektrum. Minimální mlhové mazání a středové chlazení nástrojů. [online]*. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/minimalni-mlhove-mazani-a-stredove-chlazení-nastroju.html>
- [14] *LPW SPOL. S R.O. Řízené systémy minimálního mazání - M&K system. [online]*. 2006 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.lpw.cz/doc/kovoinzert-MM-04-2006.pdf>
- [15] KOCIÁN, Petr. *Obrábění materiálů typu Inconel 718*. Bakalářská práce. Plzeň: ZČU v Plzni, Fakulta strojní, 2012. 55 s. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.

- [16] WMSYSTEM. *VM3 - VM3.N ukázky z praxe [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.vmsystem.eu/ukazky-z-praxevm3.html>*
- [17] WMSYSTEM. *Návod k obsluze přístroje určeného k směšování vzduchu a oleje: VM3N. [online]. s. 4 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.vmsystem.eu/download/vm3n.pdf>*
- [18] KENDA, Jani; PUSAVEC, Franci; KOPAC, Janez. Analysis of Residual Stresses in Sustainable Cryogenic Machining of Nickel Based Alloy - Inconel 718. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. August 2011, 133, 4, s. 041009-1 - 041009-7.
- [19] MM Průmyslové spektrum. V budoucnosti budou těžce obrobitelné materiály obráběny za velmi nízkých teplot. [online]. 2012 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.vmsystem.eu/download/vm3n.pdf>
- [20] SANDVIK COROMANT. *Obráběcí nástroje Sandvik Coromant: Soustružnické nástroje. 2012. vyd. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/turn_g.pdf*
- [21] HUMÁR, Anton. *Technologie I : Technologie obrábění-1. část studijní opory pro magisterskou formu studia [online]. 2003 [cit. 2011-10-04]. Dostupné z : <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf>.*
- [22] Idaho Machinery Company: SECO “Jetstream” Turning Tools. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://idahomachinery.net/featured-products/seco-cutting-tool/>
- [23] SECO TOOLS: Erfolgreiche Lösungen - Jetstream Tooling. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://www.secotools.com/de-AT/Global/Losungen-fur-die-Industrie/Aerospace/Erfolgreiche-Losungen/Winning_Solutions_Jetstream_Tooling/
- [25] TAMARIN, Y., *Protective Coatings for Turbine Blades – Phase Composition and Structure of Coatings on Superalloys. ASM International, USA. 2002. ISBN 0-87170-759-4.*
- [26] HOUDKOVÁ, Š., a kol., *Žárové nástřiky - moderní technologie povrchových úprav, dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/>*
- [27] www.istrojirenstvi.cz. *Povlakování a životnost nástroje.[online].[cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/vyroba/precist.php?nazev=povlakovani-a-zivotnost-nastroje&id=39>*
- [28] TUNGALOY CZECH S.R.O. *Hlavní katalog: Nástroje pro obrábění [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://www.tungaloy.co.jp/cz/products/catalog/tungaloy-czech_2011-2012.pdf*
- [29] TUNGALOY CORPORATION. *PVD coated grade for superalloy turning: AH 905 [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.tungaloy.co.jp/common/products/pdf/404.pdf>*
- [30] Chronicle Kennametal. Kennametal Inc. [online]. 2011 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://chronicle.kennametal.com/blog/2011/8/9/the-new-beyond-blast-turning-program.html>
- [31] SANDVIK COROMANT. *ISO S HRSA and Titanium [online]. [cit. 2013-06-16]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_s_hrsa_titanium/pages/default.aspx*