

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Obrábění materiálů typu Inconel 718

Autor: **Petr Kocián**

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

Akademický rok 2011/2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr KOCIÁN**
Osobní číslo: **S11B0197K**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Obrábění materiálů typu Inconel 718**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

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

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu - polotovary, odlitky, výkovky
3. Nástroje pro hrubování IN 718 při frézování
4. Ekonomické parametry při obrábění IN 718
5. Závěr

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

STANĚK, J.; NĚMEJC, J.: Metodika zpracování a úprava diplomových prací.

Plzeň: ZČU, 2005

Internetové stránky

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.

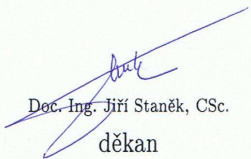
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.

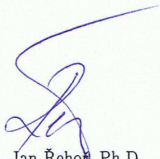
Katedra technologie obrábění

Datum zadání bakalářské práce: 18. října 2011

Termín odevzdání bakalářské práce: 29. června 2012


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. prosince 2011

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kocián	Jméno Petr	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVISTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Obrábění materiálů typu Inconel 718		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	55	TEXTOVÁ ČÁST	53	GRAFICKÁ ČÁST	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	V bakalářské práci je zpracováno obrábění slitiny Inconel 718, zejména proces hrubování. Je zde popsáno jakých strojů a nástrojů se používá, včetně jejich chlazení. Dále jsou zde uvedeny příklady použití materiálu Inconel 718.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Inconel 718, fréza, frézování, hrubování, obrobiteľnosť, chlazení, řezná destička

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Kocián		Name Petr	
FIELD OF STUDY	2301R016 “Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.		Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Type of machining Inconel 718			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Technology of Metal Cutting	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	-----------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	55	TEXT PART	53	GRAPHICAL PART	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	It is processed by machining Inconel 718 alloy in the thesis, especially roughing process. It describes what machines and tools used, including cooling. There are also examples of use of the material Inconel 718.
KEY WORDS	Inconel 718, cutter, milling, roughing, machinability, cooling, cutting plate

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 bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodickou pomoc při realizaci této bakalářské práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	9
1 ÚVOD	10
2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	11
2.1 OBLASTI POUŽITÍ.....	13
2.2 SLOŽENÍ SLITINY TYPU INCONEL 718	13
2.2.1 <i>Nikl</i>	14
2.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI INCONEL 718.....	14
2.3.1 <i>Mechanické vlastnosti povrchu</i>	17
2.3.2 <i>Teplotní stabilita</i>	18
2.4 POLOTOVARY, ODLITKY A VÝKOVKY	19
2.4.1 <i>Polotovary</i>	19
2.4.2 <i>Odlitky</i>	19
2.4.3 <i>Výkovky</i>	20
3 OBRÁBĚNÍ INCONELU 718	21
3.1 ISO TŘÍDY	21
3.1.1 <i>Třída S</i>	21
3.2 OBROBITELNOST	24
3.2.1 <i>Vliv příměsí niklu</i>	25
3.3 FRÉZOVÁNÍ	26
3.3.1 <i>Materiály nástrojů</i>	27
3.3.2 <i>Povlaky nástrojů</i>	29
3.3.3 <i>Nástroje pro hrubování materiálu INCONEL 718</i>	29
3.3.4 <i>VBD</i>	34
3.3.5 <i>Stroje pro frézování INCONELU 718</i>	35
3.3.6 <i>Inovace v obrábění frézováním</i>	37
3.3.7 <i>Frézování složitých součástek</i>	37
3.3.8 <i>Oběžné kolo turbodmychadla</i>	38
3.4 POSTPROCESSOR	41
3.5 CHLAZENÍ	42
3.5.1 <i>Procesní kapaliny</i>	43
3.5.2 <i>Kryogenní chlazení</i>	44
3.5.3 <i>Beyond BLAST - chlazení</i>	45
3.6 RECYKLACE BŘITOVÝCH DESTIČEK.....	46
4 EKONOMICKÉ PARAMETRY	46
4.1 ZVÝŠENÍ PRODUKTIVITY	47
4.2 SNÍŽENÍ NÁKLADŮ.....	47
4.3 DOKONALEJŠÍ ZÁSOBOVÁNÍ	48
4.4 PLÁNOVÁNÍ A REALIZACE	48
5 ZÁVĚR	49
POUŽITÁ LITERATURA	1
PŘÍLOHA Č. 1	3

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka/symbol	Popis
VBD	Vyměnitelná břitová destička
PVD	Physical Vapour Deposition – nanášení (otěruvzdorné vrstvy) odpařením z pevné vrstvy
ICR	Typová řada pro obrábění žáruvzdorných materiálů
HPC	Vysocevýkonné obrábění
CNC	Computer Numeric Control – číslicové řízení počítačem
CAM	Computer Aided Manufacturing - Počítačem podporovaná výroba
CL	Cutting Location Data – produkt procesoru
USB	Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice pro připojení periférií k počítači

1 Úvod

Současná věda se snaží o vytvoření nových „supermateriálů“, které by splňovaly celou řadu velmi vysokých nároků a požadavků dnešních či budoucích výrobců i zákazníků. Jedná se především o takové materiály, které by byly lehké a přitom vysoce odolné s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a dlouhou životností. Tyto materiály představují úsporu nejen energetickou, ale také finanční, která je rozhodujícím kritériem investorů. Slitina Inconel 718 je právě jedním z těchto materiálů budoucnosti.

Mým úkolem je zpracovat přehled obrábění a použití materiálu Inconel 718. Jedná se o materiál původně určený pro vesmírné projekty, který stejně jako např. teflon našel uplatnění i v civilní sféře.

Cílem této bakalářské práce je představit obrábění a použití této „superslitiny“, kterou materiály typu Inconel bezesporu jsou. Je zde popsáno jaké nástroje se při obrábění používají a kde všude se tento materiál používá.

Název INCONEL pochází z anglického „Inco“, který je vlastně registrovanou ochrannou známkou americké společnosti Special Metals Corporation. Jedná se o značku speciálních sružených (Corporation) kovů, používaných v aplikacích s vysokou teplotou, mající vysokou odolnost proti korozi v kyselých a velmi agresivních prostředích obsahující například mořskou vodu či plyn jakým je sirovodík. Tyto vlastnosti samozřejmě souvisí s chemickým složením a technologií výroby Inconelu. Číselné označení slitiny typu Inconel 718 udává poměr použitých surovin, jako je například nikl, hliník, železo a podobně. Složení této slitiny je patrné z hmotnostní tabulky, udávané procentuelně, která je umístěna v hlavním textu.

Superslitina INCONEL 718 je spolu se superslitinou INCONEL 625 všestrannou austenitickou slitinou s vynikající pevností a tvárností při vysokých teplotách. Ovšem jsou stejně jako jiné austenitické slitiny s obsahem velkého množství Ti a Al náchylné k praskání při svařování.

Vedle Inconelu 718 a 625 existují také materiály číselné řady Inconel 600, 617, 690, 751 a 939, z nichž každý má trochu jiné složení a jiné vlastnosti co do použití. Přesto, že tyto zmíněné řady Inconelu nejsou předmětem této bakalářské práce, myslím si, že není zcela od věci je alespoň představit a vysvětlit rozdíly mezi nimi. Proto jim z kraje své práce věnuji malý odstavec.

Slitina typu Inconel bude dle mého názoru užitečná především v nedaleké budoucnosti, kdy své využití nalezne například při těžbě ropy nebo zemního plynu. S úbytkem těchto strategických surovin bude nutné hledat nová naleziště hluboko pod mořským dnem. Právě i s touto těžbou souvisí výzkum nových superslitin jako je Inconel, které by měly sloužit k provádění hlubinných vrtů. Vždyť již nyní jsme podle některých odhadů překročili tzv. PeakOil, což znamená, že se nacházíme v okamžiku od kterého už se objem ropy bude „pouze snižovat“. Do té doby než nalezneme vhodnou alternativu za tyto suroviny, se musí najít způsob jakým je těžít i z velkých hloubek pod mořským dnem.

Při těžbě ropy pomocí hlubinných vrtů musí být nástroje zhotoveny z materiálu, který vydrží nejen vysoké teploty nad 260 °C, ale vydrží také agresivní prostředí a vysoké tlaky 172 MPa. Takový materiál pak musí být samozřejmě kromě zmíněných vlastností také nákladově efektivní a spolehlivý.

Toto je pouze jeden z příkladů použití slitiny Inconelu, která ovšem pro své vlastnosti nabízí daleko větší možnost použití.

2 Rozbor současného stavu

Druhy slitiny INCONEL:

Inconel 600: masivní, posílení

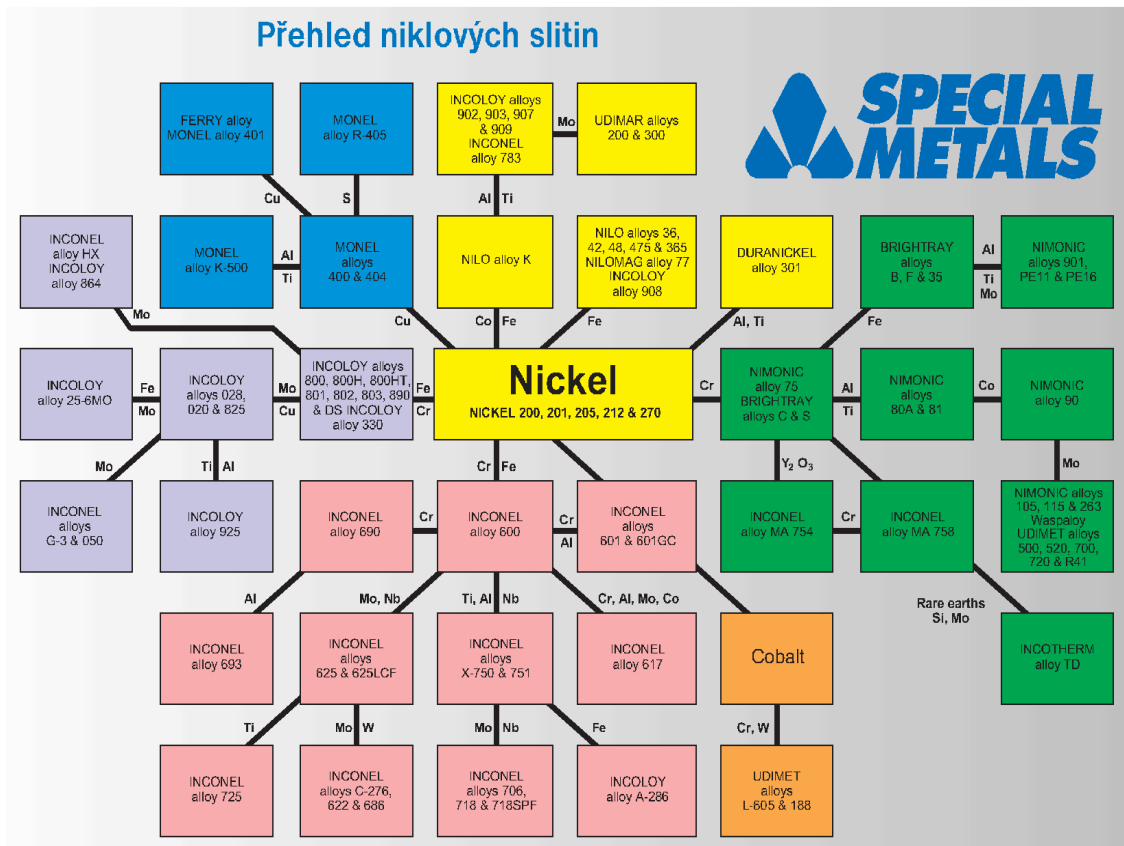
Inconel 625: kyselinovzdorné s dobrou svařitelností

Inconel 690: nízký obsah kobaltu, pro jaderné aplikace

Inconel 718: gamma dvojité zesílení s dobrou svařitelností

Inconel 751: zvýšený obsah hliníku pro lepší pevnost rozsah 1600 °F

Inconel 939: gamma základní posílení

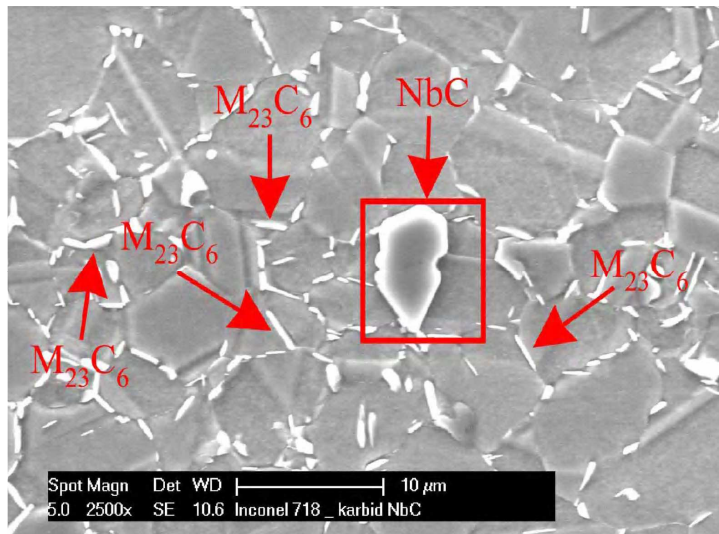


obr. 1: Sumarizující graf slitin na bázi niklu [34]

INCONEL 718

Chemický vzorec tohoto materiálu je NiCr19NbMo .

Materiál typu Inconel 718 je superslitinou s vysokým obsahem niklu a využívá se při extrémních teplotách, vysoce korozivních a speciálních aplikacích. Základ této slitiny tvoří nikl (Ni), který je feromagnetický, kujný, tažný kov, odolný vůči korozi. [3]



obr. 2: struktura Inconelu 718 [36]

2.1 Oblasti použití

Slitina typu Inconel 718, původně vyvinuta pro vesmírné účely, nalezla široké uplatnění i v civilní sféře.

Inconel 718 se používá především v extrémních podmínkách. Uplatňuje se v plynových turbínách; jako těsnění spalovací komory; při konstrukci turbodmychadla, ponorného čerpadla, výfukových systémů, tlakových nádob, parních generátorů jaderných tlakovodních reaktorů, nádrží raket na tuhá paliva, apod. Stále více se Inconel používá také v kotlích spaloven odpadu nebo jako komponenty pro kapalné palivo raket, prstény či pouzdra. Dále byla tato slitina použita při výrobě raketového letadla X-15 či při konstrukci Joint European Torus (JET) plavidla, uvnitř nějž je zahřátá plazma. [4],[5], [6], [34]

2.2 Složení slitiny typu Inconel 718

Slitina INCONEL 718 nese označení NI-PH2601

INCONEL 718	Prvek (v % hmotnosti)							
	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Cu
	50,0 – 55,0	17,0 – 21,0	zůstatek	2,8 – 3,3	4,75 – 5,5	1,0	0,35	0,2 – 0,8
INCONEL 718	Prvek (v % hmotnosti)							
	Al	Ti	Si	C	S	P	B	
	0,65 – 1,15	0,3	0,35	0,08	0,015	0,015	0,006	

Tab.1. Chemické složení Inconelu 718 [3]

2.2.1 Nikl

Nikl byl náhodně objeven roku 1751 němcem Alexem Cronstedtem, při pokusech o izolaci mědi z rudy. Je základní surovinou k výrobě slitiny Inconel 718 a udává její základní mechanické vlastnosti.

Nikl se ve sloučeninách vyskytuje v mocenství Ni^{+2} , Ni^{+1} a nestálé Ni^{+3} . Tento prvek je poměrně stálý vůči působení vzduchu, vodě, alkálií, apod. Jako jeden z mála prvků má negativní dopad na lidský organismus (6-10% obyvatel trpí alergií na nikl).[2]

Tento kovový feromagnetický prvek bílé barvy se v čisté podobě v přírodě nevyskytuje, ale přesto však je v přírodě poměrně hojně zastoupen. Jeho výroba je velmi složitá a v konečné fázi se většinou získává oxid nikelnatý (NiO), který je dále redukován koksem a čištěn elektrolýzou.

Mechanické vlastnosti niklu rostou s klesající teplotou a při $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosahuje 1,5x vyšší pevnosti.

Rekrystalizace nastává při $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nad $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ silně klesá pevnost, teplota tání je $1455\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nikl dosahuje 4 stupně tvrdosti na Mohsově stupnici.

Slitiny niklu jsou obecně pevnější, tvrdší a houževnatější než většina neželezných kovů. Podle použití je rozdělujeme na slitiny konstrukční, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi, slitiny žáruvzdorné a žáropevné. [2]

2.3 Mechanické vlastnosti INCONEL 718

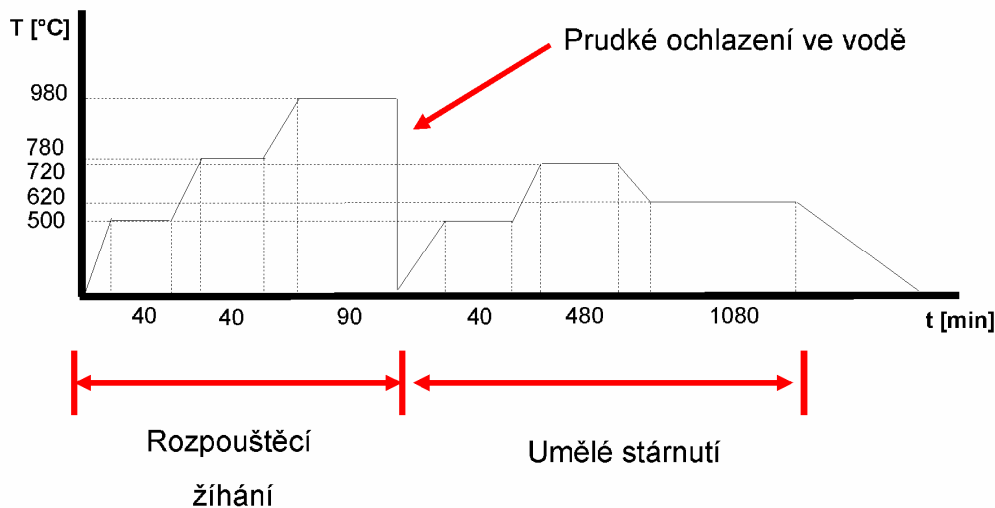
Slitina niklu Inconel 718 je nikl chrom materiál, vysoce odolný proti korozi. Jeho použitelnost je v rozmezí teplot -253 až $760\text{ }^{\circ}\text{C}$, některé prameny hovoří dokonce o rozmezí teplot -423 až $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na mechanické vlastnosti Inconelu 718, stejně jako i na jiné kovy, má vliv teplota a doba při jeho zpracování, čímž se zároveň ovlivňují i funkční vlastnosti této superslitiny. Nejvýznamnějším tepelným zpracováním je tzv. srážení kalením, které obsahuje procesy jako je kalení, žihání a stárnutí. Tepelným ošetřením je nutné zajistit vztah mezi fází „ γ a δ “. Fáze γ je míra zhrubnutí, týkající se koherence kmene. Zvýšením poměru Ti/Al dochází ke zvýšení soudržnosti kmene a zhrubnutí vazby Ni-slitiny. [10]

K popuštění žíhání je velmi žádoucí dostatečná teplota. Lze zvolit různé technologické postupy. Zde jsou uvedeny dva příklady tepelného zpracování označené písmeny A a B, lišící se teplotou zpracování.

A.

Popouštěcí žíhání je provedeno při teplotě 905 – 1010 °C. Pak kaleno ve vodě, po dobu 8 hodin při teplotě 720 °C. Poté se teplota v peci sníží na 620 °C. Při této teplotě se materiál ponechá v peci 18 hodin, kdy probíhá proces „zrání neboli stárnutí γ “. Jako chladivo je použit vzduch.



obr. 3: Příklad A - Graf tepelného zpracování Inconelu 718

[36]

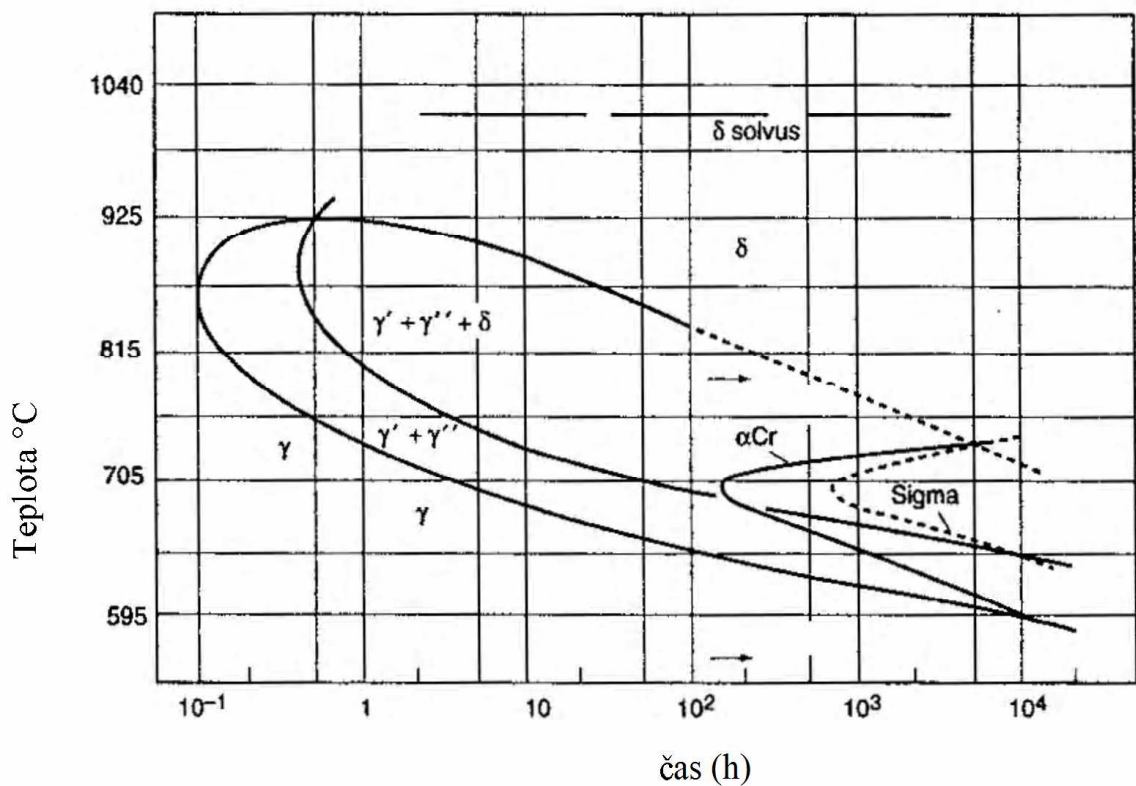
B.

Popouštěcí žíhání je provedeno při teplotě 1035 – 1065 °C. Pak kaleno ve vodě, po dobu 10 hodin při teplotě 760 °C. Poté se teplota v peci sníží na 650 °C. Při této teplotě se materiál ponechá v peci 20 hodin, kdy probíhá proces zrání neboli stárnutí. Jako chladivo je použit vzduch.

S rostoucí teplotou při zpracování se mění mechanické a korelační vlastnosti materiálu, související se změnou mikrostruktury. To znamená, že se mění velikost krystalických zrn Inconelu. V případě postupu příkladu A je velikost zrn 8,5 nm, zatímco při postupu příkladu B je velikost zrn 42 nm. Tento významný růst zrn je pozorovatelný teprve po úplném rozpouštění fáze δ . Tato fáze se rozpouští při žíhání.

Při mechanickém zatížení Inconelu silou 235 kN, v případě příkladu B má tato slitina větší deformační vlastnosti a schopnosti než-li v příkladu A. Toto lze pozorovat na křivce v grafu. Křivku je možno rozdělit na dvě části. První část sleduje tzv. elastickou deformaci a je-li tato část překročena, nastává druhá část, která sleduje tzv. plastickou deformaci (Dokud nedojde k přerušení materiálu v nejvíce namáhaném místě).

S velikostí zrna se také mění pevnost, mez kluzu a tvárnost slitiny. Při snížení velikosti zrn to znamená, že dojde ke zvýšení pevnosti (u zrn 80 nm – 1920 MPa), mezi kluzu, ale snižuje se tvárnost slitiny. [10]



obr. 4: IRA diagram Inconel 718 [37]

Měrná hmotnost [g.cm-3]	Teplota tavení [°C]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Modul pružnosti ve smyku [GPa]	Tvrdość HRC	Mez pevnosti v tahu [MPa]
8,19	1336	204,9	77,2	36	1240

Tab. 2. Vybrané vlastnosti slitiny Inconel 718

2.3.1 Mechanické vlastnosti povrchu

Vlastnosti finálního výrobku jsou velkou měrou ovlivňovány vlastnostmi povrchových a podpovrchových vrstev. Proto je nutné věnovat velkou pozornost vlastnostem povrchu. Vždyť více než z 90% objemu provozních lomů tvoří únavové poškození. Výjimku tvoří poškození strukturální, metalografické či konstrukční chyby, které mohou přesunout iniciaci dále od povrchu. Jedná se např. o trhliny, překalenou povrchovou vrstvu, zápichy apod.

Při tepelných úpravách povrchu, které se provádějí za účelem zlepšení fyzikálních vlastností materiálu, dochází k iniciování tlakového napětí, která často přecházejí náhle k napětí tahovému. Další zbytková napětí jsou v materiálu iniciována teplem po broušení nebo jiném opracování výrobku.

V případě, že ve výrobku přetrvává část vnitřních pnutí i po odstranění vnějšího impulsu, hovoří se právě o zbytkovém napětí či pnutí a je tvořeno v důsledku nehomogenní deformace. Toto zbytkové napětí lze obecně definovat jako víceosé. Zbytková napětí také vznikají při depozici tenkých vrstev-substrátu, kterým se v minulosti nevěnovala taková pozornost, ale která je velmi důležitá, neboť určuje odolnost vůči mechanickému zatížení. Zbytkové napětí tlakového charakteru je závislé na charakteru povrchu, jeho drsnosti i profilu výstupků. Největší nebezpečí vzniku trhlinek je přisuzováno právě zbytkovému napětí, kdy na povrchu vzniká tlaková složka, zatímco pod povrchem přechází ve složku tahovou.

Klasifikace zbytkových napětí je provedena podle příčin jejich vzniku. Jedná se o deformační zbytkové napětí, které vzniká při obrábění (kdy jsou povrchové vrstvy deformovány intenzivněji než-li vnitřní vrstvy) a strukturální zbytkové napětí (kdy je nehomogenní strukturální transformace doprovázena objemovými změnami). Úroveň napětí je určena velikostí elastické deformace vyvolané změnou objemu materiálu, která plně odpovídá vnitřnímu napětí. [7]

Vlivy působící na povrch materiálu během opracování:

Vnější vlivy:

Mechanické (provozní napětí)

Chemické (koroze)

Fyzikální (záření, bludné proudy atd.)

Kombinace více vlivů (kromě výše zmíněných se také jedná o technologické procesy při zpracování) [7]

Vnitřní vlivy:

Zbytkové napětí

Morfologie povrchu (drsnost)

Materiálové a mechanické vlastnosti povrchu (povrchová úprava jako různé vrstvy či povlaky, dále tvrdost, zpevnění a strukturní stav)

Přítomnost povrchových a podpovrchových vad a heterogenní struktura. [7]

Pro měření zbytkového napětí se používá metody mechanické (měření po odstranění části vzorku odvrtním apod.), optické, magnetické (pomocí Barkhauzenova šumu), ultrazvukové (rychlost ultrazvukových vln v materiálu ve vztahu s napětím) nebo difrakce (rentgenové záření nebo tok neutronů). Zbytkové napětí superslitiny Inconel 718 je prakticky neměřitelné.

Prosazení integrity povrchu do praxe je velice obtížné zejména ke zjištěným hodnotám a jejich dopadu na kvalitu výrobku, která se projeví až po poslední operaci. Ovšem výrobcům přinese velkou konkurenční výhodu. [7]

2.3.2 Teplotní stabilita

Teplotní stabilita je velmi důležitým faktorem materiálů použitých například v plynových turbínách. Takový materiál musí mít dobré vlastnosti ve smyslu teplotní stability mikrostruktury. Jejich maximální potenciál v turbíně je využit při střední teplotě, ovšem fázová transformace a růst kinetiky jsou při této teplotě pomalé.

U slitiny typu Inconel 718 je velmi obtížné přesně předpovědět tepelné stability precipitátů γ'/γ' v tomto vícesložkovém systému.

Slitina Inconel 718 je odolná především díky srážení sekundárních fází (např. základní gama (γ) a dvojitá základní gama (γ'/γ') do kovové matrice. Srážení těchto fází je vyvoláno tepelným zpracováním v rozmezí teplot 1100 až 1500 °F.

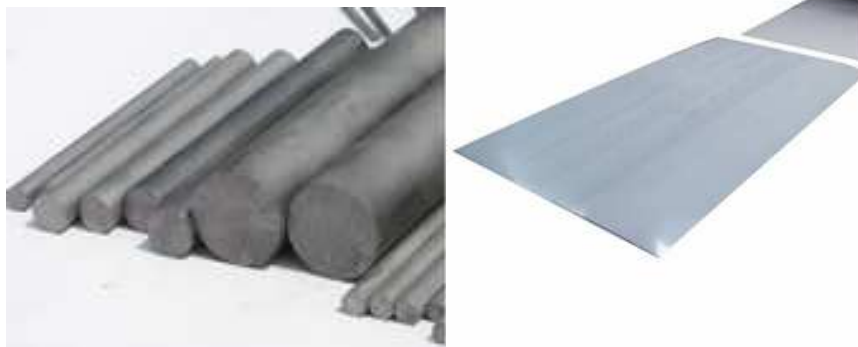
Pro tento typ slitiny se obvykle používají dva způsoby tepelného zpracování, z nichž jedním je žihání při teplotě 1700 až 1850 °C.

2.4 Polotovary, odlitky a výkovky

2.4.1 Polotovary

Polotovar je takový výrobek, který se musí ještě dále zpracovat a upravit, aby bylo dosaženo požadovaného tvaru součásti. Nejlepší polotovary jsou takové, které se co nejvíce přibližují finálnímu tvaru výrobku a nemusí se tedy příliš upravovat. Mezi polotovary spadají tyče, trubky, dráty, plechy a pásy. Tyče a trubky se vyrábí ve tvarech kruhových, čtvercových, plochých a šestihranných.

Polotovary z Inconelu 718 se dají dostat v žíhaném stavu a nebo v tvrzeném stavu. Pásy se zpracovávají v tloušťce 0,25 – 1,6mm a šířce 305 a 610mm. Plechy jsou o tloušťce 0,25 – 4mm a o šířce 900 a 1200mm. Trubky a tyče se vyrábí typizované nebo na zakázku, podle toho jaké má zákazník přání. Je tedy možnost zvolit si tyto polotovary malých či velkých rozměrů. Nebo jsou dodávány v průměrech 1 až 200mm a délky 1,2 až 6m. [31], [32]



obr. 5: Polotovary [32]

2.4.2 Odlitky

Odlitky (ingoty) se taví v pecích (např. ve vakuové indukční peci) a odlévají se do forem. Formy na odlitky jsou téměř shodného tvaru, jako je následný konečný výrobek. Pro Inconel 718 jsou chemického složení, které je uvedeno v tabulce výše. Vyrábí se v různých tvarech a průřezech jako třeba kruhový, čtvercový, obdélníkový, atd.

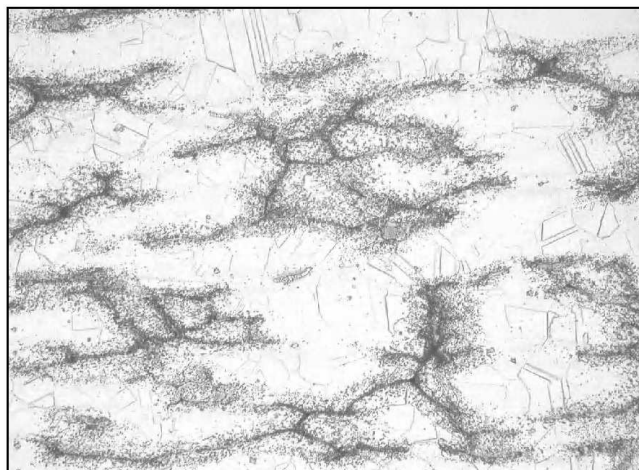
Ingoty jsou různých rozměrů podle potřeby. Nejčastěji se vyrábí o průměru 200 – 580mm a délce 300 – 2200mm. Jeden z uvedených konkrétních ingotů z materiálu, zde popisovaného, Inconel 718 je o malé velikosti kruhového průřezu o průměru 5mm, délky 10mm a hmotnosti 2kg. [24], [33]



obr. 6: Odlitky [33]

2.4.3 Výkovky

Výkovky se vyrábí většinou pomocí stroje nazývaného buchar, nebo lisováním. Na bucharu opracujeme výkovek na požadované rozměry. Výkovky jsou opět kruhového, čtvercového, apod. průřezu. Ovšem musíme si dát pozor na podélné trhliny, protože ty mohou vznikat ve výkovku při operaci kování a zároveň na povrchu mohou vznikat i příčné trhliny. Tyto trhliny jsou způsobovány shluky intermetalických částic.



obr. 7: Struktura výkovku a vzniklých trhlín [13]

V dnešní době se stále více uplatňují materiály zpracovávané v podobě prášků a je více speciálních slitin, intermetalických fází, karbidů, tvrdých kovů, cermetů, atd. Velikost zrn u těchto prášků 60 až 300 μm podle druhu lisování za tepla nebo za studena. Pro Inconel 718 máme tyto prášky řady Ampersint a jsou vhodné pro zpracování za tepla.

Kruhové výkovky se produkují postupně až do průměru 200mm, ale kovají se i ve větších průměrech pokud je takový požadavek. Jako příklad je uveden výkovek o rozměru 20 x 20mm, který byl vykován při teplotě 870 až 1100°C a stupni prokování $K = 3$. [24]

3 Obrábění Inconelu 718

V současné době jsou materiály typu Inconel stále více používány pro své výborné mechanické vlastnosti. Ovšem problém nastává při jejich obrábění, neboť jednou z mnoha vlastností Inconelu je jeho tvrdost. Obrábění takovýchto materiálů jako je Inconel 718 je tedy vždy velkou výzvou.

Jedním z nejdůležitějších úkolů při vlastním obrábění superslitiny je volba řezných materiálů a technologický postup. Tyto dva základní předpoklady úspěchu vychází z dlouholetých zkušeností firmy.

3.1 ISO Třídy

M – austenitické a feriticko austenitické oceli, korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli nemagnetické a otěruvzdorné, HARDOX apod.

S – speciální slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti, např. INCONEL

3.1.1 Třída S

Materiál Inconel 718 spadá do třídy skupiny S, a proto zde bude popsána trochu podrobněji. Pro značení nástrojových materiálů je specifikována tabulka ISO/ANSI a tyto materiály se dále dělí na základní a doplňkové třídy. Kdy základní nám udávají první volbu aplikací a doplňkové je více rozšiřují. V tabulce jsou popsány podle houževnatosti a odolnosti proti otěru. [26]

S	Základní třídy		Doplňkové třídy	
	10	-		
20	-			
30	-	H10F	S30T, S40T, GC 2030, GC 2040	H13A, GC 1040
40	-			

obr.8: Specifická tabulka pro třídu S [26]



obr.9: Vysvětlivky a symboly k tabulkám tříd [26]

H10F (HW) – S25 (S20 – S30)

Jedná se o nepovlakovanou třídu o velmi drobné velikosti zrn s velkou odolností proti opotřebení vrubu. Hodí se pro obrábění materiálů používaných v leteckém průmyslu.

S30T (HC) – S25 (S15 – S30)

Tato karbidová třída je vhodná zejména pro frézování titanu. Jejím specifickým je mikrojemné zrn a PVD povlak, což udává odolnost proti únavovému poškození, velmi velkou pevnost břitu a lépe odolává vylamování ostří. Zároveň snáší vyšší řezné podmínky a to je také nespornou výhodou.

GC2030 (HC) – S20 (S15 – S25)

Tato karbidová třída se používá při malých řezných rychlostech pro operace lehce hrubovací a polodokončovací na žáruvzdorných materiálech. Její součástí je PVD povlak.

GC1030 (HC) – S15 (S10 – S20)

Tato karbidová třída se používá při středních řezných rychlostech pro obrábění žáruvzdorných materiálů. Její součástí je PVD povlak. Vyznačuje se odolností proti plastické deformaci a také vytváření nárůstků na břitech.

S40T (HC) – S35 (S25 – S45)

Jedná se o třídu s CVD povlakem, která je vhodná pro frézování za ztížených podmínek titanových slitin, protože vydrží v řezu při operaci dlouhou dobu, dá se předem odhadnout postup opotřebení a odolává vibracím, které vznikají při frézování.

GC1010 (HC) – S10 (S05 – S10)

Opět karbidová třída vhodná pro frézování titanu. Její součástí je PVD povlak. Vhodná pro optimalizaci frézovacího procesu, jelikož i za velkých řezných rychlostí má výbornou odolnost proti otěru a citlivost na vibrace.

GC2040 (HC) – S30 (S25 – S40)

Třída je karbidová s povlakem pro frézování žáruvzdorných slitin a zejména odlitků.

H13A (HW) – S20 (S15 – S25)

Tato karbidová třída je bez povlaku, ale stále vhodná pro frézování žáruvzdorných slitin za středních řezných rychlostí. A vyznačuje se dobrou houževnatostí a odolností proti otěru.

GC1025 (HC) – S20 (S10 – S20)

Karbidová třída vhodná pro frézování žáruvzdorných slitin za středních řezných rychlostí. Její součástí je PVD povlak. Vyznačuje se odolností proti plastické deformaci a také vytváření nárůstků na břitech.

GC1040 (HC) – S30 (S20 – S35)

Karbidová třída, která se vyznačuje svou houževnatostí. Použití je pro frézování za velice obtížných podmínek při středních i nízkých řezných rychlostech či rychlostí posuvu. Jejím součástí je PVD povlak. Zejména se využívá tam, kde jsou kladeny vysoké nároky na spolehlivost a ostrost břitu. [26]

3.2 Obrobitelnost

Obrobitelnost je vlastně schopnost materiálu být dobře obráběn. Na opracovatelnost materiálu mají největší dopad např. geometrie břitu makroskopické i mikroskopické, zjištění mechanických vlastností a metalurgie obráběného materiálu a v neposlední řadě také z jakého materiálu zvolit vhodný nástroj a správné řezné podmínky pro samotné obrábění, aby proces probíhal co možná nejlépe ze všech hledisek.

Při výběru správného nástroje a řezné destičky by měla být použita pozitivní geometrie břitu a řezná hrana vhodně zaoblená, protože tak při výjezdu frézy z řezu zmírňuje ulpívání třísek. Důvodem snížení životnosti nástroje a zhoršení jakosti obrobenej plochy je vylamování břitu destičky, opotřebení tvaru vrubu a hřbetu řezné destičky. Dobré řešení je pootáčení destiček po určitých dobách a to z pohledu spolehlivosti procesu. Stroj by měl být o vysoké tuhosti, výkonu a kroutícím momentem za malých otáček.

Běžnými konvenčními metodami je Inconel těžko obrobitelný a to díky svým již popsaným vlastnostem. Jakmile se totiž s nástrojem zajede do obrobku, tak okamžitě dochází k vytvoření článkovitých třísek a k jeho zpevnění, z něhož vyplývá plastická deformace. Toto také přispívá ke vzniku vysokých dynamických řezných sil. Kvůli tomu se využívá nástroj z tvrdého materiálu za pomoci metody pomalého a silového řezu. Nástroj musí být zároveň vhodně upnutý, protože i toto přispívá ke zlepšení obrobitelnosti. [26]

U Inconelu 718 může za jeho vyšší pevnostní vlastnosti zhoršený pohyb dislokací mikrostrukturou γ''/γ . Toto má vliv na obrobitelnost. Dalším vlivem na obrobitelnost je tažnost, která stoupá se stoupající teplotou, protože má za následek zatížení břitu na nástroji. Při teplotě 800°C tažnost dosahuje až skoro 30%. [12]

Díky špatné tepelné vodivosti materiálu, adhezi a dalším již zde popsaným vlastnostem dochází ke značnému poškození ve vrubu VBD (dochází tak k abrazivnímu vlivu na břit),

a to se týká konkrétně největší hloubky řezu. Při frézování žáruvzdorných slitin jako je Inconel 718 dochází k vysokým teplotám a ty mají za následek omezení řezné rychlosti. Rady jsou takové, že je lepší použít VBD s pozitivní geometrií a s velkým úhlem nastavení. Z hlediska zredukování opotřebení vrubu na destičce a ztenčení třísky je vhodné použít kruhovou VBD.

Pokud hovoříme o dobré obrobitelnosti, tak máme na mysli poklidný průběh při obrábění se vzájemnou dlouhodobou životností použitého nástroje. Obrobitelnost se hodnotí využitím přímo uzpůsobených zkoušek. [26],[27]

3.2.1 Vliv příměsí niklu

Síra – napadá povrch exponovaných součástí. Má velmi malou rozpustnost s Ni. Při 645 °C tvorba eutektika – křehkost za tepla i za studena. Vliv síry se eliminuje pomocí manganu.

Příměsí síry do materiálu se zlepšuje jeho obrobitelnost a zdokonaluje se lámavost vznikající třísky. Zmíněná obrobitelnost se usnadní díky nižšímu řeznému odporu. Dále stoupne při frézování kluzný (mazací) účinek. Nevýhodou však je, že zhrubne povrch obrobku při prováděné operaci, což se však dá vyloučit použitím řezné kapaliny. Dalším negativem je tvorba hnědých skvrn na materiálu při obrábění za vysokých teplot. [18], [41]

Křemík – působí obdobně jako mangan. Váže kyslík a uvolňuje tím pro síru mangan. Výborně váže síru a částečně se rozpouští v niklu.

Značně ovlivňuje stupeň opotřebení vyměnitelné destičky. A to tak, že se opotřebovává špička daného nástroje při použitých vyšších řezných rychlostech, ale čelo nástroje naopak méně.

Uhlík – je omezeně rozpustný v tuhém stavu. Karbid Ni_3C je stabilní jen v tavení za vysokých teplot. Nikl je grafitotvorný – změna v rozpustnosti vede k segregaci na hranicích zrn vede ke snížení pevnosti a mezi tečení.

Pokud se v materiálu nachází jeho větší obsah, tak se snižuje řezná obrobitelnost. [18]

Konstrukční slitiny

Ni-Mn: přísada Mn zlepšuje korozní odolnost v prostředí se sírou při vyšších teplotách (kontakty spalovacích svíček). A také zlepšuje obrobitelnost materiálu.

Ni-Co: 4,5 % Co zvyšuje magnetické vlastnosti (použití v elektrotechnice a ultrazvukových zařízeních).

Tento prvek zvyšuje odolnost proti otěru a hůře se utváří třísky z obrobku. Při frézování stoupá riziko možného poškození hlavního břitu nástroje a geometrie VBD. Z tohoto plyne, že je komplikované provádět obrábění klasickými konvenčními nástroji.

Ni-Be: do 1% Be lze slitinu precipitačně vytvrzovat až na 1800 MPa (výroba pružin, forem pro vstřikování plastů a membrán do teploty až 500 °C).

Ni-Al: 4,5 % Al lze slitinu precipitačně vytvrdit až na 1350 MPa (tažené a vytvrzované dráty, výroba pump, hřídelí apod.).

Ni-Si a Ni-Mo: přidáním cca 10% Si nebo 35% Mo se na povrchu vytvoří silná pasivační vrstva a zvyšuje se odolnost proti kyselině sírové (použití v chemickém průmyslu).

Díky molybdenu se materiál lépe svařuje a zdokonalují se jeho mechanické vlastnosti za vysokých teplot. Zároveň tento prvek vytváří karbidy a tím se nám značně zvyšuje pevnost v tahu.

Ni-Cu: 67% Ni + 30% Cu s přísadou malého množství Si, Al, Fe, Mn má výbornou odolnost proti korozi, dobrou pevnost i houževnatost a tepelnou vodivost (použití v potravinářství, energetice, námořních aplikacích a chemickém průmyslu). Měď v kombinaci s niklem vytváří tuhý roztok s vysokou teplotou tavení.

Měď jako taková nám zaručuje dobrou obrobitelnost, snižuje potřebnou řeznou sílu na obrábění a ještě zmírní účinek mechanického zpevnění povrchu obrobku.

Ni-Nb: Inconel, díky částečnému obsahu niobu, i při vysokých teplotách zaručuje neměnné vlastnosti. Je to současně stabilizační prvek. Niob totiž spolu s niklem utváří sloučeninu Ni_3Nb ve formě malých kubických krystalků, která právě při vyšších teplotách zamezuje deformaci materiálu. [18], [27], [41]

3.3 Frézování

Obráběním materiálu frézováním se na obrobku vytváří rovinné a tvarové plochy, drážky, ozubená kola a dokonce i závity. Hlavním rozdílem mezi soustruhem a frézou je v rotačním

pohybu. Při soustružení rotuje materiál, zatímco při frézování rotuje nástroj a obrobek koná pouze vedlejší pohyb (posuv).

Frézování je obrábění kovového materiálu vícebřítým nástrojem, který řezným kruhovým pohybem vytváří rovinné a zakřivené plochy.

Do větena frézky se fréza upíná buď přímo nebo prostřednictvím redukčních kuželů, frézovacích trnů, upínacích pouzder a spojek. Samotný obrobek je na stůl frézy upnut do svěráku, upínacího přípravku či upínkami.

3.3.1 Materiály nástrojů

Požadavky na materiál:

tvrdost,

odolnost proti opotřebení,

tepelná vodivost,

pevnost v ohybu,

houževnatost.

3.3.1.1 Řezné materiály k obrábění materiálu INCONEL 718

Řezný materiál při obrábění slitiny jako je Inconel 718 musí být tvrdší nežli vlastní obráběný materiál.

Supertvrdé řezné materiály

Do této skupiny patří polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB) a polykrystalický diamant (PD). Jedná se o vůbec nejtvrdší a samozřejmě nejdražší materiály na trhu.

Tvrdost PKNB se blíží tvrdosti diamantu a vyrábí se za vysokých teplot a tlaků. Je chemicky stabilní, odolný proti abrazivnímu opotřebení a jeho vysoká tvrdost je zachována i při teplotách 1200 °C.

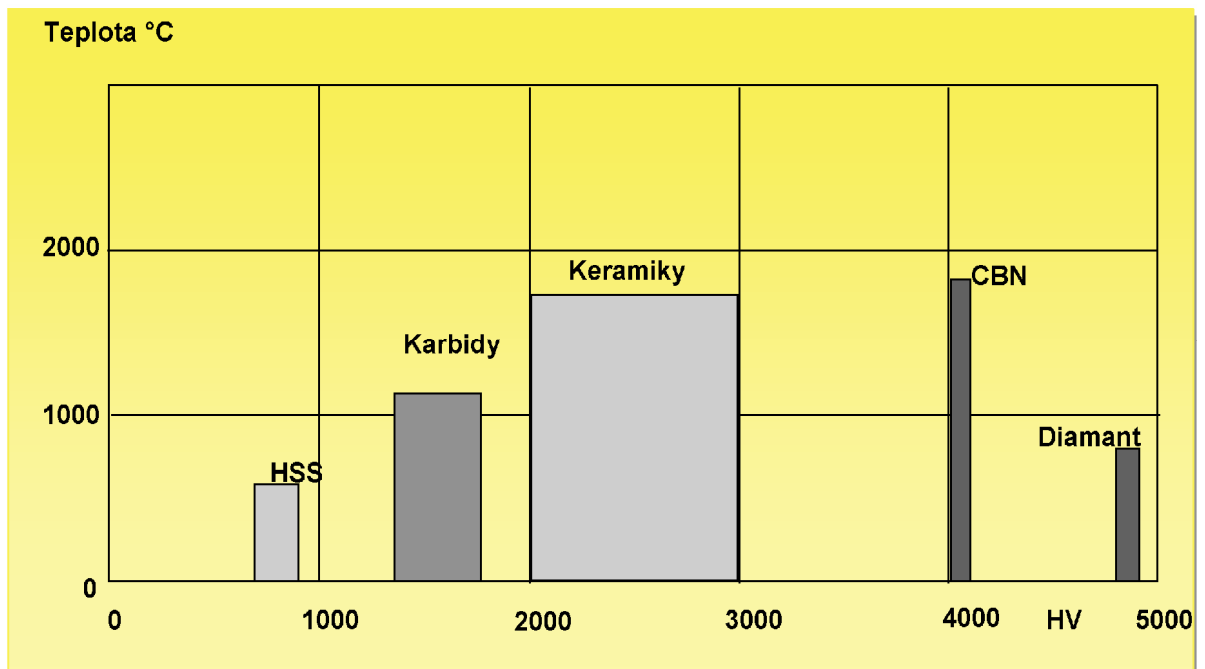
PD vyrobený slinováním jemných krystalů diamantů za vysokých teplot a tlaků, dosahuje téměř tvrdosti monokrystalického diamantu. Životnost PD je mnohonásobně vyšší než PKNB.

Řezná keramika

V současné době je na trhu několik firem nabízející řeznou keramiku dosahující požadovaných vlastností. Znaky řezné keramiky jsou vysoká tvrdost, křehkost, chemická stálost nízká tepelná vodivost. Tento materiál velmi dobře snáší teploty na břitů až do 1200 °C, jelikož reaguje s kyslíkem až při této teplotě a vyšší. Jeho použití je při řezných rychlostech 300 – 1600 m.min⁻¹.

Jedná se například o vysokovýkonný řezný materiál CBN (kubický nitrid boru), který je svou tvrdostí překonatelný pouze diamantem. Jeho použití je hlavně při obrábění materiálů s tvrdostí cca 45 HRC. Jedná se především o exotické materiály jako jsou slitiny na bázi niklu, železa, kobaltu, tvrzenou litinu, chromovou litinu a šedou litinu. Jedním ze zástupců je právě Inconel 718. CBN nereaguje s původci karbidu, které jsou obsaženy ve výše uvedených materiálech jako je tomu u PD a monokrystalického diamantu.

Řezná keramika se dělí na oxidovou (CA – vysoká odolnost proti opotřebení), směsnou (CM – s přísadou neoxidických komponentů), neoxidickou (CN) a povlakovou (CC – kombinace CA,CM,CN). Pro účely obrábění Inconelu 718 se používá zejména řezná keramika s označením CN, jejíž složení je na bázi nitridu křemíku Si₃N₄.



obr. 8: Srovnání řezných materiálů dle tvrdosti a tepelné vodivosti

[25]

Dalším z nástrojů, které se k jejich obrábění používají jsou nové závitníky EMUGE Rekord 1D_r-Ni-TiCN, Rekord 2D_r-Ni-TiCN, Rekord 1C-Ni-TiCN a Rekord 2C-Ni-TiCN. S těmito závitníky lze dosáhnout ekonomické efektivity a bezpečnosti obrábění. [35]

3.3.2 Povlaky nástrojů

Povlakový materiál pod označením IC806 od firmy Iscar, který byl vyvinut, je vhodný pro obrábění vysokoteplotních ocelí. Současně je velice dobrý pro použití na zde popsaný materiál Inconel 718. IC 806 se řadí mezi submikronové třídy s PVD TiAlN a s vynikající odolností a životností.

Tento povlak potlačuje problémy, které vznikají při frézování tohoto Inconelu, jako je vyšší teplota na hraně destičky (což se děje díky složení materiálu, zvláště abrazivním částicím v něm), lámání destiček, vruby a jejich vysoké opotřebení. Dalšími obtížemi jsou samokalící efekt za provádění řezných činností a znetváření díky metalurgické citlivosti na zbytková napětí.

Toto vše se zmírní nebo dokonce vymizí za použití řezných břitových destiček s uvedeným povlakem a tím je umožněno frézovat efektivněji. [13]

3.3.3 Nástroje pro hrubování materiálu INCONEL 718

Frézy se produkují jako vícebřité nástroje a jsou i tvarově složitější než třeba soustružnické nože. Při návrhu a konstrukci je třeba se zaměřit na to, jak se při použití frézy bude třít tříska po čele nástroje a celkově, jak se bude tvořit. [19]

Fréza hrubovací SGS

Série 62M

Upnutí do stroje pomocí stopky

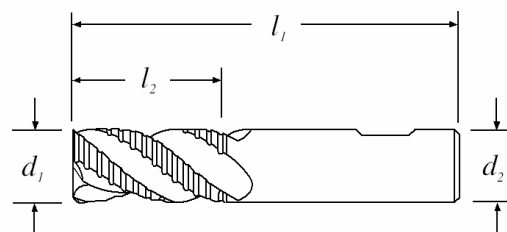
Specifická pro obrábění Inconelu

a jemu podobných niklových slitin

Povlak frézy TiAlN

Uvedený příklad:

$d_1 = 12 \text{ mm}$



obr. 9: Fréza hrubovací SGS [19]

$d_2 = 12 \text{ mm}$
 $l_1 = 83 \text{ mm}$
 $l_2 = 26 \text{ mm}$
 rohový rádius je 1,52 mm
 šroubovice 20°

Řezné podmínky:

$v_c = 12 - 18 \text{ m/min}$
 $n = 660 \text{ ot/min}$
 $z = 4$
 $f_z = 0,038 - 0,064 \text{ mm/zub}$
 $a_p = 1 \times d_1$

Fréza hrubovací ICR

TK stopková fréza HPC – nástroj k aplikaci pro velmi výkonné hrubovací frézování, kdy si současně udrží dlouhou životnost.

Frézy ICR jsou určeny pro obrábění žáruvzdorných slitin typu Inconel.

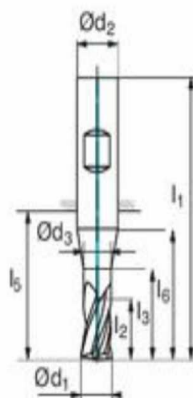
DIN 6527

Nástroj je vyráběn s ner

ovnoměrnou roztečí zubů, radiální podbroušení a rozdílný úhel λ_s , díky tomu má během obrábění tichý chod a měkký řez vzájemně s vysokou stabilitou.

Můžeme s frézou obrábět až do teploty 900°C, pokud je na ní navíc nanesen povlak Ti1500 s vrstvou AlTiN.

Přívod procesní kapaliny probíhá pomocí axiálního otvoru v nástroji. [20]



Uvedený příklad:

$d_1 = 10 \text{ mm}$
 $d_2 = 10 \text{ mm}$
 $d_3 = 9,5 \text{ mm}$
 $l_1 = 72 \text{ mm}$
 $l_2 = 22 \text{ mm}$



obr. 10: Hrubovací stopková fréza ICR [20]

$$l_3 = 30 \text{ mm}$$

$$l_5 = 32 \text{ mm}$$

$$l_6 = (\text{v tomto případě se neuvádí})$$

Řezné podmínky:

$$v_c = 45 \text{ m/min}$$

$$z = 4$$

$$K = 0,2$$

$$f_z = 0,044 \text{ mm/zub}$$

$$a_p = 0,5 \times d_1$$

$$a_p = 1,5 \times d_1 \text{ ... při frézování drážek}$$

$$a_e = 1 \times d_1$$

$$\lambda_s = 38 - 40^\circ$$

$$\gamma_s = 10^\circ$$

Fréza hrubovací - HELITANG T490 LNK-13-INT

Čelní válcová fréza HPC s tangenciálně uloženými čtyřbřitými destičkami a kuželovou stopkou.

Tato fréza je určena pro velmi výkonné, zejména hrubovací, frézování s klidným a lehkým průběhem při záběru.

Používaná na obrábění velké škály materiálů, samozřejmě i Inconelu.

Procesní kapalina je přiváděna k místu řezu vnitřkem nástroje.

Velikosti používaných destiček jsou 8, 13 a 16mm. [6]

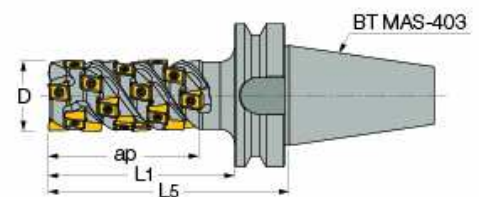
Uvedený příklad:

$$D = 63 \text{ mm}$$

$$a_p = 117 \text{ mm}$$

$$L1 = 168 \text{ mm}$$

$$L5 = 188 \text{ mm}$$



obr. 11 Čelní válcová fréza HPC [6]

$$m = 5,5 \text{ kg}$$

Řezné podmínky:

$$a_p = 15 \text{ mm}$$

$$Z_{\text{eff}} = 4$$

$$z = 40$$

$$SS = 50^\circ$$

Fréza hrubovací – CoroMill 316

U této frézy je možnost vyměnit řeznou hlavu, což bude zajisté ekonomicky a časově výhodné.

S povlakem GC1030 se fréza stává velmi výkonnou, protože zajistí tomuto nástroji velmi vysokou ostrost břitu.

Umožňuje pěti-osé obrábění.

Nástroj zaručuje díky geometrii vysokou stabilitu při hrubovacích operacích a pracovat 5x vyšší rychlostí posuvu. [21]

$$d = 10 - 20 \text{ mm}$$

$$l = 167 \text{ mm}$$

Řezné podmínky:

$$v_c = 25 \text{ m/min}$$

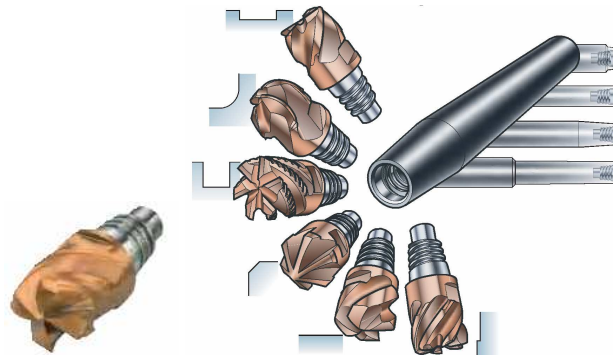
$$D_c = 10 \text{ mm}$$

$$z = 4$$

$$f_z = 0,05 \text{ mm/zub}$$

$$a_p = 0,2 \text{ mm}$$

$$a_e = 0,2 \text{ mm}$$



obr. 12: Fréza hrubovací – CoroMill 316 [21]

Fréza hrubovací – Kennametal Mill 1-14

Stopková fréza víceřadá se zuby ve šroubovici.

S axiálními podpurnými čepy.

Umožňuje velkou škálu nájezdových úhlů při sestupném frézování.

Samozřejmostí jsou chladicí trysky pro přívod procesní kapaliny. [43]

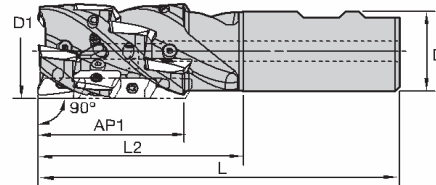
Uvedený příklad:

$$D_1 = 40 \text{ mm}$$

$$D = 32 \text{ mm}$$

$$L = 111 \text{ mm}$$

$$L_2 = 50 \text{ mm}$$



Řezné podmínky:

$$v_c = 30 \text{ m/min}$$

$$n = 28400 \text{ ot/min}$$

$$z = 6$$

$$f_z = 0,05 \text{ mm/zub}$$

$$A_{p1} = 28 \text{ mm}$$

$$\text{Max. sestupný úhel} = 3,8^\circ$$



obr. 13: Fréza hrubovací – Kennametal Mill [43]

Fréza hrubovací – TUNGALOY Tecslot TSN10R160M40.0E16-07

Vyznačuje se vysokou produktivitou při současném velkém úběru materiálu z obrobku.

Nástroj má pevné celistvé tělo a VBD jsou uloženy tangenciálně.

Je zaručen výborný odvod třísek z místa řezu. [42]

Uvedený příklad:

$$D_c = 125 \text{ mm}$$

$$D_b = 66 \text{ mm}$$

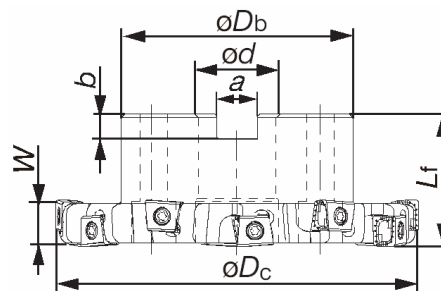
$$d = 32 \text{ mm}$$

$$L_f = 50 \text{ mm}$$

$$W = 16 \text{ mm}$$

$$b = 8 \text{ mm}$$

$$a = 14,4 \text{ mm}$$



Řezné podmínky:

$$v_c = 20 \text{ až } 35 \text{ m/min}$$

obr. 14 Fréza hrubovací – TUNGALOY Tecslot [42]

$$t = 0,07 \text{ až } 0,13 \text{ mm}$$

$$f_z = 0,3 \text{ mm/ot}$$

$$a_e = 16 \text{ mm}$$

$$r_e = 0,8 \text{ mm}$$

3.3.4 VBD

Většina destiček VBD je vyrobena ze slinutých karbidů (SK), řezné keramiky, cermetů, polykrystalického kubického nitridu boru (PKNB) a z polykrystalického diamantu (PD). Tyto VBD destičky bývají vícebřité, takže je lze po opotřebení otáčet.

Za použití řezných destiček z keramiky probíhá obrábění materiálu při větších řezných rychlostech, až 30krát vyšších než u destiček z SK.

3.3.4.1 Použitá řezná destička při obrábění Inconelu 718

Na ukázkou je předložena řezná destička SPKN, která byla použita při experimentu frézování Inconelu 718 na katedře KTO. Při obrábění dochází vlivem struktury obráběného materiálu, který je vysoce tvrdý, k vylamování destičky a v okolí ostří vznikají vruby. Ke vzniku vrubů na ostří destičky dochází díky vysokým teplotám, které jsou způsobeny obráběním tvrdého materiálu Inconel. Břitová destička je tak mnohem více zatížena. Je snahou eliminace jejího zatížení přívodem procesní kapaliny a ochlazovat tak místo řezu. Destička je současně zřejmě z křehčího materiálu, a tak se břit vylamuje. Z obr. 17 jsou patrné vzniklé vruby na destičce.



obr. 15: Použité břitové destičky SPKN na katedře KTO [44]

Řezné podmínky:

$$n = 300 \text{ ot/min}$$

$$f_z = 0,15 \text{ mm}$$

3.3.5 Stroje pro frézování INCONELU 718**Frézka – TOStec OPTIMA**

CNC Obráběcí centrum, které je celé zakrytované a s vodorovně položenou osou vřetena.

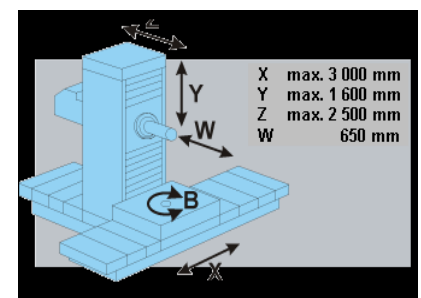
Stůl je otočně uložený a lože jsou uspořádána do tvaru písmene T.

Stroj je určený i pro 5-ti osé obrábění.

Automatické řízení stroje je zaručeno kompatibilními systémy Heidenhain iTNC 530 nebo Sinumerik 840D. [30]

Parametry:

Max. otáčky vřetena	3 000 min ⁻¹
Max. přípustný přenášený výkon	28 kW
Max. krouticí moment na vřetenu	1 000 Nm
Max. hmotnost obrobku	10 000 kg
Upínací plocha stolu	1 250 × 1 250 mm
	1 250 × 1 600
Osa X	3000 mm
Osa Y	1600 mm
Osa Z	2500 mm
Osa W	650 mm
Pracovní posuvy X, Y, Z, W	1 - 15 000 mm.min ⁻¹
Pracovní posuv B	0,003 - 1,5 min ⁻¹
Rychloposuv - X, Y, Z	24 000 mm.min ⁻¹
Rychloposuv - W	20 000 mm.min ⁻¹
Rychloposuv - B	6,5 min ⁻¹
Max. průměr nástroje s nástroji	125 mm
Bez	320 mm
Max. délka nástroje	500 mm



obr. 16: Frézka – TOStec OPTIMA [30]

Celkový čas výměny nástroje	14 sec
Čas automatické výměny palet	90 sec

Frézka – FU EFEKTIV

Jak už vlastní název napovídá, je to obráběcí centrum na velice efektivní úrovni. Zároveň je jeho cena velice příznivá, takže má výhody i z pohledu ekonomického hlediska. Hlavní vřeteník stroje se skládá z vřetenových hlav, a tím lze využít obrábění více jak pětiosé. Také je možné obrábět součásti komplikovanějších tvarů na základě výsuvné pinoly, která se může do stroje zakomponovat. Jeho další výhodou je snadný odvod procesní kapaliny a třísek z místa řezu. [29]



obr. 17: Frézka – FU EFEKTIV [29]

Parametry:

Pracovní zdvih	X	3000 mm
	Y	1250 mm
	Z	2000 mm
Rozsah posuvů	X	1-20000 mm/min
	Y	1-10000 mm/min
	Z	1-10000 mm/min
Výkon pohonu		28 kW
Vřeteno:	ØD	150 mm
	W	1000 mm
max. kroutící moment		3300 Nm
rozsah otáček		20 – 4000 min ⁻¹

Frézka – StyleHightech STYLE BT 1500E

Jedná se o CNC frézku, která má snadné programování s jeho krátkým nastavením, což nám přináší úsporu drahocenného času. U stroje se naskýtá možnost připojení USB, to usnadní přenos dat. [28]

Parametry:

Rozsah X	1500 mm
Y	650 mm
Z	600 mm
Pracovní stůl	610x1810mm
T-drážky	5x18mm
Max. zatížení stolu	800Kg
Výška pracovního stolu	850mm
Výkon motoru	7,5kW
Max. otáčky	8000/12000rpm
Posuv	0,01-2000 mm/min
Točivý moment	31,5Nm



obr. 18: Frézka – StyleHightech
STYLE BT 1500E [28]

3.3.6 Inovace v obrábění frézováním

Stejně jako je tomu ve všech odvětvích, tak i v oblasti frézování, tzv. třískového obrábění, dochází k neustálým inovacím. Toto se děje především z důvodu zvyšování produktivity a konkurenceschopnosti firem.

Jednou z posledních velkých inovací je tzv. Adaptivní obrábění. Jedná se o speciální výpočet dráhy, který nelze dosáhnout běžným způsobem, aby bylo dosaženo maximálního zatížení řezného nástroje, ale nedocházelo k jeho přetížení. Tato technologie dále nabízí použití „Redukce kroku“, čímž lze optimalizovat výslednou drsnost povrchu.

Adaptivní obrábění zajišťuje, při maximální bezpečnosti procesu, odebrání co nejvíce materiálu v co nejkratším čase při optimalizaci drsnosti povrchu.

Budoucnost zcela jistě přinese mnoho výrazných inovací, ale tato inovace zůstává nejvýznamnějším přínosem z hlediska produktivity a bezpečnosti obráběcího procesu. [40]

3.3.7 Frézování složitých součástek

Na frézování součástí o složitém tvaru je potřeba zvolit správný nástroj, protože při špatném výběru by mohlo dojít k potížím a komplikacím nebo by se operace vůbec nemusela

vyvést. Mnoho výrobců se také snaží takové vhodné nástroje vyrobit a nabídnout zákazníkům na trh.

Příkladem může být výroba takových profilových drážek na lopatce disku turbín, která má dosti komplikovaný tvar a je náročná na přesnost obrábění. Pro toto obrábění je vhodné použít kvalitní stopkovou frézu stromečkovitého tvaru, která je vyrobena z monolitního slinutého karbidu s konstantním úhlem čela. Taková fréza zaručuje přesně obrobený povrch, umožní souvislé a bezproblémové obrobení obrobku a výrazně sníží výrobní čas. Tyto klady pomohou zvednout produktivitu a výkonnost, jelikož díky snížení času stihneme vyhrubovat více profilových drážek v pracovní době, a dovolují snížit cenu.

Pro frézování součástek se běžně používá tří a čtyř-osé frézování. Ovšem u součástek jako je lopatkové oběžné kolo turbodmyhadla, používaných v osobních automobilech, lodí či v letadlech, se z důvodu tvarové náročnosti používá frézování pěti-osé. Tvar oběžného kola bývá dosti často velmi složitých ploch se zkroucenými a překrývajícími se lopatkami. Pěti-osého frézování lze u frézovacích center dosáhnout pomocí naklápěcího a otočného stolu. Pokud se totiž nepoužije pěti-osé obrábění, tak mohou nastat kolize nástroje a lopatky kola.

Základním rozdílem této technologie je pět stupňů volnosti, což znamená, že se nástroj může natáčet celkem v pěti osách. Libovolné natáčení nástroje během obráběcího procesu zvyšuje produktivitu, kvalitu a plánování tras nástroje.

Zhotovení lopatkového kola je velice komplikované a dá se říct, že bez softwaru CAM až neuskutečnitelné. Většina CAM systémů má velmi propracované strategie na dokončování lopatek oběžného kola, ale co se týká hrubování, které je velmi důležité z hlediska času a přesnosti, to už u těchto strojů tak propracované není. [1], [8]

3.3.8 Oběžné kolo turbodmyhadla

Princip turbodmyhadla spočívá ve zvýšení tlaku vzduchu ve válcích motoru, čímž dochází ke zvýšení výkonu motoru.

Podle konstrukce tohoto lopatkového kola, dosahují jeho otáčky až $300\,000\text{ ot.min}^{-1}$. Proto bývá jako ložisek použito buď vysoce kvalitních kuličkových ložisek, většinou však tzv. fluidních ložisek, jejichž olej musí být před návratem do mazací soustavy motoru ochlazen.

Oběžné kolo turbodmyhadla je součástka opatřená soustavou lopatek na středové základně. Lopatka obsahuje kromě náběhové a koncové hrany, vrchní (nasávací) a spodní (tlakový) povrch.

Samotná konstrukce turbodmychadla je provedena ze žáruvzdorného materiálu se žáruvzdornými nástřiky a povlaky, protože při jeho činnosti dochází k velkému zahřátí vzduchu.

Pomocí hydromechanických a termomechanických výpočtů se provede předběžný výpočet geometrie. Křivka základny je získána optimalizačním algoritmem. [1], [40]

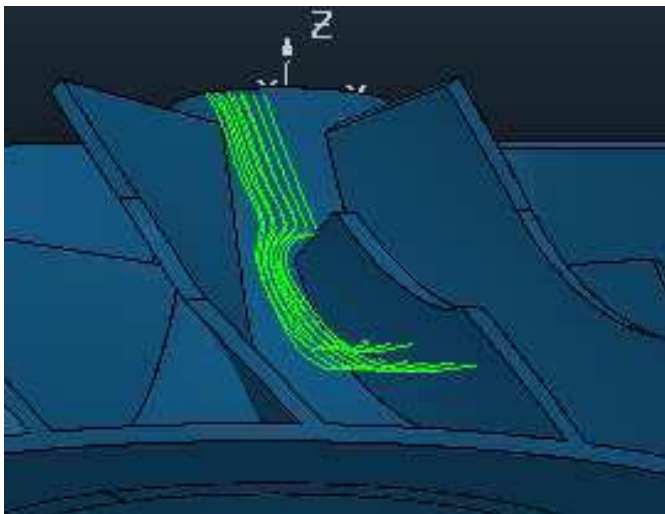
3.3.8.1 Zvolení materiálu a základní operace

Zvoleným materiálem při výrobě oběžného kola je v tomto případě superslitina Inconel 718, který si své pevnostní charakteristiky uchovává i při extrémních teplotách. Díky rychlému zpevnění má však horší obrobiteľnosť. Ke zpevnění dochází při prvním průchodu nástroje, přičemž je zde nebezpečí elastické deformace obrobku nebo nástroje samotného.

Upnutí polotovaru se stává klíčovým pro další průběh operací a technologického postupu. Vhodné je upnutí na trn za již hotový vnitřní průměr obrobku. Trn je upnut ve sklíčidle na otočném a klopném stole, umožňujícím pěti-osé obrábění. [1], [8]

3.3.8.1.1 Hrubování

Než se zahájí vlastní hrubování, tak se musí odhalit případné problémy, které by mohly nastat. Následně se naplánuje průběh drah pro chystanou operaci a určí se místa vybrání na



obr. 19: ukázka hrubovacích drah lopatkového kola [1]

lopatkách dle hloubky.

Pro správné nastavení strategie musí být přesně definována a nastavena geometrie lopatkového kola. To znamená nastavit pravou i levou lopatku (případně i mezilopatku a radius podél lopatek), hrany lopatkového kola a střed. Nastavení geometrie se provede pomocí hladin nebo sad.

Po vytvoření pěti prázdných hladin, se každé z nich přiřadí dané geometrie. Pro velké lopatky a mezilopatky byly též přiřazeny z obou stran velké zkroucené plochy, ale ne hrany. U hrany je nastaveno ignorování obrábění, střed obrobku, vytvořený z jedné plochy, je označen celý.

Stylem offset je dráha generována nahoru a vzhledem k hrubování je zde použito obousměrného obrábění. Nastavení přídavku na dokončení je zvolen 0,3 mm, nastavení kroku 2 mm a krok dolů je nastaven 1 mm. Natočení osy nástroje je zde provedeno automaticky, podle geometrie. Základní vyklonění je pod úhlem 45°, z důvodu obrobení veškerých míst polotovaru, která by při nastavení úhlu 0° nebylo možno provést. Jedná se především o střed a místa nad lopatkami. [1]

Nájezd z bezpečné roviny se nachází 5 mm nad polotovarem oběžného kola. Samotné řešení propojení drah krátkých vzdáleností je obloukem a u dlouhých vzdáleností je zvolena nejkratší možná trasa. Dráha se modeluje pro zadaný počet lopatek dohromady, ale může být též rozkopírována dráha jedné lopatky mezi dráhy ostatních lopatek. Nastavením kroků při počítání drah je dána vysoká hustota těchto drah.

Z důvodu malých rozměrů prostoru mezi lopatkami se volí nástroj malého průměru. Pro hrubování je vhodný nástroj firmy Iscar č.: EB030A08-4C04, který je vhodný pro vysokorychlostní obrábění a obsahuje čtyři zuby o řezné části délky 8 mm. [1]

3.3.8.1.1.1 Řezné podmínky

Doporučená řezná rychlost: $v_c = 120 \text{ m.min}^{-1}$,

Doporučený posuv: $f_z = 0,05 \text{ mm}$,

Ostatní řezné podmínky v závislosti na velikosti nástroje lze z těchto dvou údajů automaticky dopočítat pomocí operačního systému PowerMILL.

Posuv: $f = 2546 \text{ mm.min}^{-1}$,

Otáčky: $n = 12732 \text{ ot.min}^{-1}$,

V závislosti na namáhání stroje a stabilitě řezných podmínek je zvolen menší posuv oproti automaticky vypočítané velikosti posuvu.

Posuv: $f = 1800 \text{ mm.min}^{-1}$,

Sjezdový posuv je nastaven na hodnotu 500 m.min^{-1} .

Čas vyhrubování jednoho mezilopátkového prostoru je při takto nastavených řezných podmínkách $t_1 = 0:06:02 \text{ hod.}$ Celkový čas pro všech šest lopatek činí $t_{\text{celk}} = 0:36:12 \text{ hod.}$ [1]

Optimalizace obrábění oběžného kola

Vzhledem k použitým strategiím obrábění je možno použít v rámci hrubování polotovaru tzv. předhrubování či jinou volbu polotovaru.

Předhrubováním se v tomto případě rozumí obrábění prostoru, který nezasahuje do lopatek a větším nástrojem. Lze též použít menší nástroj, kterým by se částečně obrobil také prostor mezi lopatkami. Zde by bylo možno použít hrubování offsetem, což znamená že se jedná o strategii, při které je odebráno co největší množství materiálu v co nejkratším čase. Toto hrubování slouží k obrábění složitých 3D tvarů a kapes. Samozřejmostí je přídavek 2,5 mm, který zajistí, že nedojde k zasažení do výsledného profilu. Hloubka třísky je nastavena na velikost 4 mm. Vhodným nástrojem, který je možno použít je stopková fréza firmy Iscar HM90 E90A-D18-2-C16-C, se třemi vyměnitelnými břitovými destičkami. Po předhrubování by se použila výše popsaná strategie Hrubování.

V případě volby jiného polotovaru, je myšleno osoustružení válcového profilu až na tvar přímo kopírující tvar lopatek na CNC soustruhu, pak by vlastní frézování obsahovalo hrubování prostoru mezi lopatkami, dokončení lopatek a středu.

Způsob volby jiného polotovaru by byl z ekonomického hlediska časově a finančně nákladný a proto nevyhovující. [1], [8], [40]

3.3.8.1.2 Obrábění bez specializovaných strategií

Použití speciálních strategií výrobu nejen usnadní, ale též urychlí. Bez těchto strategií by se muselo využívat strategie univerzální. Při použití této univerzální strategie by se lišil technologický postup především při obrábění prostoru pod lopatkami, kdy by bylo nutné natočení vřetena. Obrobení velké části mezilopátkového prostoru při nastavení určitého přídavku by byla provedena bez zásahu do výsledného profilu. Třísku při obrábění boku by bylo nutno nastavit podle zkroucení lopatky.[1], [40]

3.4 Postprocessor

Postprocessor je jakousi „spojkou“ mezi výpočetní technikou a strojem. Aby mohl stroj správně a bezchybně pracovat, je nutné převést veškerá data z CAM programu na kódy stroji srozumitelné. CL data lze použít jako výstupní formát, který obsahuje souřadnice

nástrojových tras. Dalším výstupním formátem může být NC program. K převedení dat z CAN na NC program slouží postprocessor, který je vlastně převodníkem dat ze systému CAD/CAM do jazyka konkrétního stroje tak, aby se efektivně a optimálně využilo všech jeho funkcí. Každý CNC stroj má ovšem jinou konfiguraci a tudíž se musí postprocessor pro každý stroj zvlášť doladit. Dokonalé doladění postprocesoru trvá u jednodušších strojů cca jeden měsíc, u složitějších pak déle.

Postprocessor si firma může nechat vytvořit u specializované firmy přímo na konkrétní stroj, nebo si jej zvolit z databáze vytvořených postprocesorů. Zvolený postprocessor z vytvořené databáze ovšem nebude zcela vyhovující, ale pro většinu operací bude dostačující.

Postprocessor je vytvořen pomocí speciálního softwaru, jako je EdgeCAM konstruktér postprocesorů. Další možností je použití běžného programovacího jazyka (C++, Pascal apod.). [1]

3.5 Chlazení

Chlazení je velmi důležité při obrábění jakéhokoli materiálu, zvláště pak u materiálů s větší tvrdostí, neboť se zde při obrábění dosahuje větších teplot. Správným způsobem chlazení se dosahuje vyšší produktivity.

Například při výrobě takových součástí jako je spalovací komora letadel se musí vzhledem k jejich rozměrům používat nástroje s dlouhým vyložem. Tyto nástroje je nutné dobře chladit a proto je vzhledem k efektivnosti výroby důležité používat přesně směrované chladivo tryskající pod tlakem až 500 barů. Chladivo se vstříkuje větší rychlostí přesně do bodu řezu. Tím je možno výrobu zvýšit až o 30 - 50%. Tohoto úspěchu dosáhl italský výrobce obráběcích strojů Pietro Carnaghi kombinací několika faktorů. Mezi nejdůležitější



obr. 20: Chlazení firmy Ibag [9]

patří nejen tlaková úprava, ale také vstříkování chladiva přesně do bodu ubírání materiálu destičkou VBD. Tím se omezuje hromadění třísek v místě obrábění, zdokonaluje se utváření a dělení třísek, zlepšuje se kvalita povrchu a nástroj má delší životnost. Následkem je zlepšení řezných podmínek při obrábění těžkoobrobitelných materiálů používaných např. v leteckém průmyslu (jako je Inconel 718).

Součástky z Inconelu 718 tak lze obrábět mnohem efektivněji.

Touto problematikou se též zabývá firma Coromant Capto, která v říjnu roku 2007 uvedla svůj systém Coro Turn HP na trh.

Vysokotlaký systém se již osvědčil při vnějším a vnitřním soustružení, vyvrtávání a obrábění tvarů. Není proto pochyb, že jeho využívání bude stále častější.

Vysoká statická pevnost spolu s vysoce tlumící schopností hydrostatického vodiče umožňuje zkrátit obráběcí dobu i v případě dlouhého vyloženého nástroje. [23]

Např. firma Seco doporučuje pro obrábění Inconelu břitové destičky z kubického nitridu boru CBN100 nebo CBN10. S těmito VBD dosáhneme při hrubování a současném tlakovém chlazení lepších výsledků a to takových, že se výrazně sníží délka odváděných třísek a zároveň se zvýší trvanlivost nástroje až o 60%. Což je pro nás mnohem výhodnější, jak technologicky, tak ekonomicky. [11], [26]

3.5.1 Procesní kapaliny

Jako asi nejpraktičtější procesní kapaliny se jeví klasické minerální oleje, které obsahují mírné množství síry. Síra, která se zde nachází, zamezuje připékání nástroje a obrobku vlivem vysoké teploty a současně zdokonaluje mazání při obrábění. Avšak síra narušuje (dochází ke křehnutí) karbidy, proto se nedoporučuje používat vzájemně s nástroji s karbidovými řeznými destičkami. Nevýhodou je, že při aplikaci a zahřátí se vytváří na povrchu hnědé stopy, které musíme ihned odstranit čistícím prostředkem.

Další používané procesní kapaliny pro nižší řezné rychlosti jsou vyvíjené směsné kapaliny s lubrikačními schopnostmi. A naopak pro rychlořezném obrábění se uplatňují kapaliny s výhodnějším ochlazením, které jsou stavěné na vodní bázi. Tyto se aplikují buď ředěné s minerálními oleji nebo mohou být použity zcela samostatně. [8]

Existují také procesní kapaliny typu emulze s oleji o obsahu více jak 12% či rovnou řezné oleje. Kapaliny tohoto typu mají dobré chlazení a současně zabezpečí vyplavení třísek z místa obrábění. [10]

Syntetická řezná kapalina nejen že funguje jako kapaliny pro chlazení a mazání, ale má i brusné účinky. Tato procesní kapalina je emulzí, která je schopna pracovat i ve ztížených podmínkách, jako jsou vysoké tlaky, rychlosti a objemy odebíraného materiálu, a zároveň prodlužuje životnost nástroje. Tím se dosahuje větší produktivity práce, což je skutečný přínos. Zahrnuje aditiva, kterými není součástí síra ani chlor. Výhodou je, že tyto kapaliny mají velmi malou pěnovost. Jejich kvalita se však přibližuje polysyntetickým olejům. Obvyklé koncentrace kapaliny jsou v rozmezí 5 až 15% podle druhu zvoleného obrábění. [17]

3.5.2 Kryogenní chlazení

Kryogenní chlazení je současným trendem, kdy je snaha docílit velmi nízkých teplot a jeho následným kladným působením na materiál i nástroj. Americký. Národní institut standardů a technologií určil hranici mezi chlazením a kryogenním chlazením na 93,15. K (-180 °C). Toto rozhodnutí se jeví rozumně, protože bod varu permanentních plynů (vodík, kyslík, dusík...) se nachází pod touto hranicí oproti bodu varu běžných chladících kapalin, které jsou nastaveny opačně. Hranice však není nastavena zcela pevně a může mít určité odchylky. [16]

Pro kryogenní chlazení se využívá hlavně kapalného dusíku – LN2 (jeho fyzikálních vlastností), který je pro tyto případy naprosto ideální. Dusík se uchovává při teplotě okolo -196 °C, tím pádem máme umožněno použití rychlé a laciné zásoby chladu. Kapalný dusík lze po jeho zahřátí a následném odpaření využít po procesu jako plyn v prvotní jakosti (např. pro inertní atmosféru). Ke zkapalňování plynu (dusíku) slouží kryogenní expanzní turbíny. [15]

Tohoto chlazení se používá při obrábění těžce obrobitelných materiálů, jako je např. Inconel 718. Pro tento materiál se ostatně velice hodí, jelikož Inconel 718 je jedním z nejstabilnějších materiálů pro kryogenní chlazení. Při obrábění za použití kryogenního chlazení se mění jeho vlastnosti, struktura a dochází k rozpadání zbytkového austenitu na martenzit. Tímto je docíleno zlepšení materiálových vlastností. Dosáhne se vyšší pevnosti, houževnatosti, tepelné vodivosti, rozměrové stability a zlepší se drsnost povrchu (díky menšímu opotřebení řezné hrany nástroje při snížené teplotě). Dále se sníží pnutí v materiálu, únava materiálu (lámání a praskání) a provozní náklady. Konkrétně u Inconelu nedochází ke křehnutí ani při dosažení kryogenních teplot.

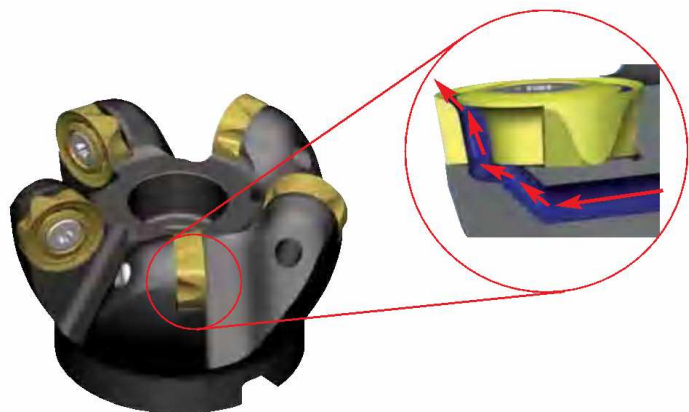
Během obrábění materiálu dochází ke zbytkovému napětí, které lze také díky tomuto chlazení částečně ovlivnit. [14]

Pro použití kryogenního chlazení při obrábění existuje mnoho metod. Uvedeným příkladem je metoda, kdy je tekutý dusík vpravován mikrotryskou přímo na čelo obráběcího nástroje před utvářecí třísky a další mikrotryskou na ostří tohoto nástroje. Dosáhne se tak větší odolnosti proti opotřebení, tvrdosti, má vliv na součinitel tření mezi nástrojem a obrobkem a velikost řezné síly, v neposlední řadě prodloužení životnosti používaného nástroje, která může vzrůst až 5x. Nejlepší a nejefektivnější je chlazení řezného nástroje i obrobku zároveň, toto bylo experimentálně dokázáno. [16]

3.5.3 Beyond BLAST - chlazení

Tento způsob chlazení vyvinula společnost Kennametal a je vhodné hlavně pro obrábění materiálů typu S do kterých spadá i Inconel 718. Využívá přesné chladicí technologie – PCT a chladicí vložky skrz kterou je chladicí kapalina s nízkým tlakem přiváděna přesně přímo do místa řezu. Tímto se sníží teplota na řezné hraně, zlepši odvod třísek z místa řezu a mazání, zvedne se produktivita a zároveň zmenší tření a smykové napětí mezi nástrojem a obráběným materiálem. Tato technologie je snadno zaměnitelná za běžnou technologii bez použití větších finančních investic.

Při použití uvedené technologie chlazení se prodlouží životnost nástroje až 3x, což je také obrovskou ekonomickou výhodou. Je to i díky větší stabilitě a spolehlivosti. Pokud používáme toto chlazení, tak si lze dovolit i větší posuvy nástroje. [38]



obr. 21: Chlazení Beyond BLAST [38]

3.6 Recyklace břitových destiček

Zhruba 40% všech použitých břitových destiček z celkového počtu produkce VBD břitových destiček se recykluje. Recyklace má velký význam pro životní prostředí nejen z hlediska použitého materiálu, ale také např. úsporu energie při výrobě, která činí 75%, a o 40% nižší produkce CO₂. Ovšem problémem jsou různá pravidla při recyklaci v různých zemích.

Nicméně recyklace je důležitá a její význam v budoucnu ještě stoupne, protože bude představovat zdroj surovin. Firma Sandvik Coromant se již zhruba deset let zabývá recyklací vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu.

4 Ekonomické parametry

Je několik faktorů, které ovlivňují výrobu těžkoobrobitelných materiálů. Významným ekonomickým kritériem v obrábění těžkoobrobitelných materiálů je množství materiálu jež lze odebrat za dobu životnosti nástroje. Dalším kritériem je použití Inconelu 718 samotného proti použití kombinace materiálů v podobě oceli a keramiky. Nelze přitom opomenout také faktory jako jsou časový úsek při obrábění a finanční stránku celé výroby.

Finanční krize způsobila a urychlila stav současné ekonomiky. Samotnou výrobu ovlivnil zejména prudký pokles americké ekonomiky. Celý svět tedy prochází ekonomickou recesí. Nikdo nedokáže říci, kdy tato recese skončí, ale po nastartování růstu ekonomiky se také současně nastartuje růst trhu. Proto je v současné době nutné připravit se na zvyšování výroby již dnes.

Technologie výroby, kterou sebou nese moderní doba, umožňuje zcela jiné možnosti než-li tomu bylo v minulosti. Samozřejmě si tato inovace průmyslu klade za cíle především úsporu a to nejen materiálu, nástrojů, ale také energie.

Těžba ropy a zemního plynu, kde se mimo jiné využívá materiál Inconel 718, je důležitá jako zdroj energie a má tedy současně velký význam pro světovou ekonomiku.

Snad všichni výrobci se snaží snížit své náklady na minimum a získat ze svých strojů více než kdy dříve. Proto hledají řešení problémů z pohledu dlouhodobého měřítka a podnikají kroky k posunutí výroby i k budoucím příležitostem. Nepřetržitá inovace a modernizace obráběcích strojů se tak stala naprostou nutností, aby výrobce udržel krok s ostatními firmami, nebo aby ještě zvýšil výrobu. Vývojáři nástrojů stále usilují o nástroje,

kteří by zajistily vyšší produktivitu při vyšší odolnosti a životnosti, což by znamenalo nižší náklady na výrobu. Důležitým faktorem je i určitá úroveň obsluhy stroje, která se podílí na ekonomice firmy. [23]

4.1 Zvýšení produktivity

Firmy by rády docílily co nejvyšší produktivity, což je pro ně současně jeden ze základních cílů. Faktory, které jsou v tomto směru nejdůležitější jsou lidé, spolehlivé stroje, správné nástroje, dobrá znalost výroby a ve výsledku kvalitní výrobky.

Produktivitu lze zvýšit i tím, že se co nejlépe zoptimalizují výrobní procesy a sníží se doba nečinnosti stroje a prostroje, a s tím souvisí minimalizace přesčasů, díky které také redukuje náklady. Další možností se stává inovace strojů, a to pořízením všestrannějších frézovacích strojů, které budou schopny vykonávat operaci rychleji, ale bohužel se nedosáhne až tak rapidního nárůstu produktivity. Dalším navýšením produktivity může být používání takových nástrojů, které potřebují nízkou údržbu k provozu.

Produktivita se dá mimo jiné zvýšit správným chlazením. Pokud zvolíme vhodnou řeznou kapalinu, správně směřovanou do řezu, pod náležitým tlakem a nastane dobrý odvod třísek z řezu, tak se zvýší produktivita o 30 až 50%.

I zásluhou povlaků, které se nanášejí na řezné nástroje a destičky, stoupne výkonnost a produktivita, a tím se také zlepšuje ekonomika. Určité povlaky totiž vyjdou i ekonomicky výhodněji, po vylepšení systémů vrstev, v porovnání s příliš finančně nákladnými VBD z masivních materiálů. [22], [23], [39]

4.2 Snížení nákladů

Dnes je značný problém, co největší snížení nákladů na výrobu. Zároveň se jedná o jeden z hlavních úkolů všech firem. O to větší problém je při zpracovávání materiálů jako je Inconel 718. Cena tohoto materiálu není zrovna nejpříznivější a nejnižší, takže si firmy nemohou dovolit vyrábět zmetky. Je důležité vždy zvážit, jak vhodně do toho či onoho investovat, jak nejlépe provést obráběcí operaci a zvážit další důležité aspekty, aby se zbytečně a příliš

neplýtvalo financemi a výrazně nestoupaly náklady. Problémem je dále vysoká energetická náročnost, cena práce a energií.

Dalším problémem se stává zkrácení vedlejších časů, které mají také značný vliv na náklady. [22], [39]

4.3 Dokonalejší zásobování

V tomto případě je důležité správně zvolit a upravit tok zásobování. Hlavními faktory, pro spolehlivý a výborně fungující tok, jsou znalost stavu zásob, veškerých nákladů a spotřeby, apod. Je tedy dobré je znát.

Používá se také automatizované zásobování, kdy je pro tento případ využíván výdejní automat, který vyniká svou lehkou ovladatelností a bezpečností. Jeho monitorovací systém sleduje a zaručuje hladký průběh transakcí, které zde zadává příslušný pracovník. Pokud je vyžadováno vysokoobrátkové zásobování, tak se může použít i automat, jenž má spirálový zásobník, hodící se pro tuto činnost.

Další oblastí, která spadá pod zásobování, je zajisté také vhodné rozvržení zásob ve skladech. Skladové zásoby mají zároveň vliv na míru efektivity výrobních procesů. S tím se rozšířila poptávka po technologických řešeních, která řeší poptávkové a skladové optimalizace. Ti co se tímto řídí, mají nižší zásoby ve skladu a současně i kratší dobu hotovostního cyklu. [22], [39]

4.4 Plánování a realizace

Jedná se o velice podstatné věci. Je třeba si předem uvědomit jakým způsobem a čeho se může dosáhnout, dále vědět jakým směrem se vydat a stanovit si dlouhodobé cíle. Pokud je vše dobře promyšleno, lze dosáhnout velkého úspěchu. U strategického plánování je důležité jaké změny udělat, pro vyrovnání se konkurenci a konkurenčnímu prostředí. Dalším značným faktorem je i předpovídat trochu budoucnost a kudy se bude ubírat vývoj.

Na technologii frézování (obecně celkového obrábění) jsou kladeny stále vyšší nároky. Ty udávají směr vývoji a následné konstrukci rezných nástrojů a vyměnitelných rezných destiček. Funguje to však i naopak, že nástroje mohou ovlivňovat technologii výroby a odběr

materiálu v průběhu obrábění. Zkrátka je to mezi sebou provázané a může to vést ke zlepšení hodnot při obrábění. Na toto je třeba brát zřetel, aby se zvyšovala produktivita a zároveň snižovaly náklady na výrobu. [22], [39]

5 Závěr

Člověk neustále posouvá hranice svých možností. S tím musí jít ruku v ruce i vývoj a zpracování nových velmi kvalitních materiálů, splňující celou řadu požadavků, které jsou na ně kladeny. Jedním z těchto „supermateriálů“ je slitina Inconel 718, který je díky svým výborným vlastnostem přímo předurčen k použití v extrémních podmínkách. Své uplatnění nachází např. v kosmických programech či při hlubinné těžbě nerostných surovin. Právě tyto obory jsou pro budoucnost lidstva téměř zásadní a jsou velmi náročné na použitý materiál. Obrábění superslitin typu Inconel 718 se pro jejich typickou tvrdost stává problémem.

Přihlédneme-li k vysoké ceně Inconelu a nákladnosti na zpracování, stává se výroba ekonomicky nákladným procesem. Dalším z řady podmínek pro obrábění tohoto materiálu jsou dlouhodobé zkušenosti firem. Tím je také dána specializace firem zabývajících se obráběním superslitin.

I přes ekonomické nevýhody, spatřované především ve vysoké ceně, má tento materiál velké výhody především v jeho tvrdosti a odolnosti vůči velmi vysokým teplotám. Tím může dojít např. k odlehčení vlastních součástek a k ekonomické a energetické úspoře.

Ze zpracovaného textu bakalářské práce vyplývá, že superslitiny jsou materiálem, bez kterého se v budoucnu lidstvo zcela jistě neobejde a proto je jejich vývoj velmi důležitý.

Použitá literatura

- [1] POSOLDA, Jiří. *Frézování složitých strojních součástí*. Brno, 2009. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17313. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jan Zouhar
- [2] Nikl a jeho slitiny: Titan a jeho slitiny. *Nikl a jeho slitiny: Titan a jeho slitiny* [online]. c2010 [cit. 2010-11-22]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf
- [3] Heat treatment and fine-blankin Inconel 718. *RMZ – Materials and Geoenvironment* [online]. 9.6.2008 [cit. 2010-11-22]. Dostupné z: http://www.rmz-mg.com/letniki/rmz55/RMZ55_0163-0172.pdf
- [4] Automobil industry. *Automobil industry* [online]. c2010 [cit. 2010-11-22]. Dostupné z: http://www.automobilindustry.cz/images/kovoinzert/clanky/Novinky%20Korloy_22.pdf
- [5] Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant* [online]. c2006 [cit. 2010-11-22]. Dostupné z: http://www.misan.cz/download/20090421-sandvik/igx200_4st.pdf
- [6] Iscar. *Iscar* [online]. c2012 [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://www.iscar.cz/Section.asp/CountryID/6/SectionID/1928/SectionFatherID/1924>
- [7] INTEGRITA POVRCHU V OBLASTI TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ. *Ateam.zcu.cz* [online]. [cit. 2010-11-22]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf
- [8] SLABÝ, Ondřej. *SESTAVENÍ TECHNOLOGIE ROTAČNÍ SOUČÁSTI Z MATERIÁLU INCONEL V PODMÍNKÁCH FIRMY FRENCKEN BRNO*. Brno, c2009. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17059. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Milna Kalivoda.
- [9] IBAG. *Ibag* [online]. c2010 [cit. 2010-12-28]. Dostupné z: <http://www.ibag.cz/>
- [10] Mmspektrum. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů* [online]. c2006 [cit. 2010-12-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-tezkoobrobitelnych-materialu>
- [11] Mmspektrum. *Mmspektrum* [online]. c2010 [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/inovace-ve-vyrobe-leteckych-komponent.html>
- [12] Mmspektrum. *Mmspektrum* [online]. c2011 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vrtani-der-se-zvysenou-presnosti.html>
- [13] Iscarex. *Iscarex* [online]. c2012 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://iscarex.cz/clanek.php?clanek=392&kdejsem=0>
- [14] Cryo-centrum. *Cryo-centrum* [online]. c2009 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z: <http://www.cryo-centrum.cz/auto-moto.html>
- [15] Chemagazin. *Chemagazin* [online]. c2009 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z: http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/chxix_3_cl6.pdf
- [16] Ininet. *Ininet* [online]. c2011 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: http://www.ininet.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=44:kryogenni-chlazen-pri-obrabeni&catid=7:clanky&Itemid=14
- [17] Průmyslová maziva. *Průmyslová maziva* [online]. c2011 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.prumyslovamaziva.cz/prumyslovamaziva/eshop/3-1-PRUMYSLOVA-MAZIVA/10-2-Rezne-chladici-kapaliny/5/128-TRIM-C276-5ltr-syntet-rezna-kapalina>
- [18] ACsteel. *ACsteel* [online]. c2010 [cit. 2012-02-14]. Dostupné z: <http://www.acsteel.cz/down/obrobitelnost.oceli.pdf>
- [19] HB Technik. *HB Technik* [online]. c2011 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <http://www.hbtech.cz/produkty/stopkove-frezy/obrabeni-zelezných-materialu/>
- [20] Youblisher. *Youblisher* [online]. c2011 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <http://www.youblisher.com/p/28180-WNT-Katalog-13-TK-frezy-CZ/>
- [21] Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant* [online]. c2009 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/brochure/CZE/C-1100-317.pdf>
- [22] Secotools. *Secotools* [online]. c2012 [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/cs/Global/Business-Solutions/>
- [23] Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant* [online]. c2009 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/mww/cs->

- cz/MWW209.pdf#search=inconel
- [24] Metal2012. *Metal2012* [online]. c2008 [cit. 2012-06-07]. Dostupné z: http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_08/Lists/Papers/031.pdf
- [25] EduCom. *Edicím* [online]. c2011 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: educom.tul.cz/getFile/case:get/id:14671
- [26] Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant* [online]. c2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/technical_guide/milling/grade_information/pages/default.aspx
- [27] Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant* [online]. c2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/technical_guide/materials/workpiece_materials/iso_s_hrsa_titanium/pages/default.aspx#
- [28] Style hightech. *Style hightech* [online]. c2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.stylehightech.cz/>
- [29] Tos Kuřim. *Tos Kuřim* [online]. c2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.tos-kurim.cz/>
- [30] Tos Varnsdorf. *Tos Varnsdorf* [online]. c2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.tosvarnsdorf.cz/cz/produkty/horizontalni-obrabeci-centra/optima/technicke-parametry.html>
- [31] Evek. *Evek* [online]. c2011 [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: <http://www.evek.cz/inconel-718.html>
- [32] Bangoalloy. *Bangoalloy* [online]. c2011 [cit. 2012-01-19]. Dostupné z: <http://www.bangoalloy.com/Czech/Inconel-Sheets/>
- [33] Titanium-alloy. *Titanium-alloy* [online]. c2011 [cit. 2012-01-19]. Dostupné z: <http://czech.titanium-alloy.com/Nickel-ingot/>
- [34] New bibus. In: *New bonus* [online]. c2010 [cit. 2011-04-15]. Dostupné z: http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/Niklove_slitiny.pdf
- [35] Emuge. In: *Rmute* [online]. c2009 [cit. 2011-04-15]. Dostupné z: http://www.emugefranken.cz/kestazeni/emuge_tvareci_zavitniky_2010_cz.pdf
- [36] Hliník, slitiny hliníku a slitiny niklu. *Hliník, slitiny hliníku a slitiny niklu* [online]. c2010 [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Slitiny09_10.pdf
- [37] Nikl a jeho slitiny. *Nikl a jeho slitiny* [online]. c2007 [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: http://katedry.fimmi.vsb.cz/637/soubory/KovyII-Ni_alloy.pdf
- [38] Kennametal. *Kennametal* [online]. c2012 [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: http://www.kennametal.cz/download/Inovace_2012.pdf
- [39] Infocube. *Infocube* [online]. c2008 [cit. 2011-01-14]. Dostupné z: http://www.infocube.cz/images/machiningtooling/clanky/Spolecnost%20Sandvik%20Coromant%20nabizi%20balik%20nastrojovych%20reseni%20pro%20vyrobu%20leteckych%20motoru_71.pdf
- [40] Technický týdeník. *Technický týdeník* [online]. c2008 [cit. 2011-04-23]. Dostupné z: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=4578&mark>
- [41] Metal2012. *Metal2012* [online]. c2005 [cit. 2011-03-15]. Dostupné z: http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_05/papers/140.pdf
- [42] Tungaloy. *Tungaloy* [online]. c2012 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.tungaloy.co.jp/common/products/pdf/408-e.pdf>
- [43] Kennametal. *Kennametal* [online]. c2012 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: http://www.kennametal.com/en-US/products_services/news/Mill_1-14_release.jhtml
- [44] KOCIÁN, Petr, vlastní foto břitové destičky SPKN
- [45] CRS tools. *CRS tools* [online]. c2012 [cit. 2012-06-17]. Dostupné z: <http://www.crstools.cz/zpetne-zahlubovani/priklady-pouziti/>
- [46] Komo-yu. *Komo-yu* [online]. c2012 [cit. 2012-06-17]. Dostupné z: <http://www.komo-yu.com/abobray/PDF/serija%205000.pdf>
- [47] Trelleborg. *Trelleborg* [online]. c2011 [cit. 2012-06-17]. Dostupné z: http://www.tss.trelleborg.com/cz/cz/products_2/staticseals/datailpages_staticseals/wills-rings-c.html
- [48] TST servis. *TST servis* [online]. c2007 [cit. 2012-06-17]. Dostupné z: http://www.tstservis.cz/pdf/Mubea_Katalog.pdf

PŘÍLOHA č. 1

Použití materiálu Inconel 718

Proudové motory

Tyto motory se používají v letectví pro pohon civilních i vojenských letadel. Materiál Inconel 718 je v této oblasti hojně využíván. Zpracovány jsou z něj různé součásti proudových motorů, jako lopatky turbín, přírubové díly, bloky motorů, apod. [45], [8]



Obr. 1) Lopatka turbínu pro proudový motor [8]



Obr. 2) Přírubový díl motoru [45]



Obr. 3) Segment bloku motoru [45]

Automobilový průmysl

Zde se z tohoto Inconelu 718 vyrábí součástky převážně opět do motorů, výfukového systému a elektroniky. Zejména výfukové potrubí, zapalovací jednotky, ventily, elektronické senzory a jednotky. Dochází ke stálému zpřísnění norem ohledně znečišťování životního prostředí a díky zpracování součástí ze zde popisovaného materiálu se mohou požadavky lépe splňovat. [2], [34]



Obr. 4) Spalovací motor [2]

Těžba a zpracování ropy a zemního plynu

Při těžbě v moři a jiných agresivních prostředích se používá pro konstrukci veškerých zařízení právě materiálu Inconel. Pro tyto prostředí má plně vyhovující vlastnosti. Např. v těžebních otvorech by mohly nastat velké problémy v provozu těžby, protože je zde vysoká teplota a kyselé plyny společně s ropou, a při aplikaci součástí z této superslitiny se problémy potlačí nebo dokonce vymizí. Konstruuji se vrtné plošiny, vrtné nástroje a potrubí, spalovací stožáry a další důležité prvky. [34]

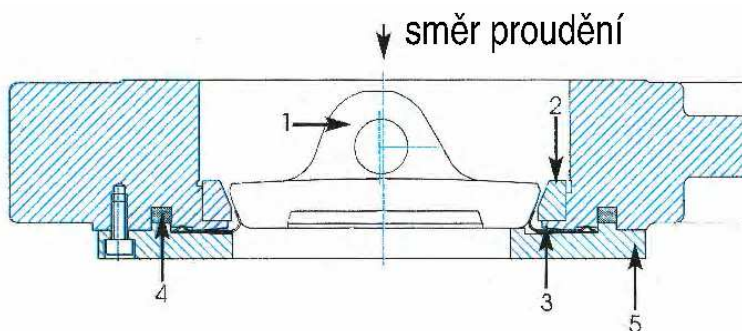


Obr. 5) Vrtné plošiny [34]

Těsnění

Dalším příkladem použití je výroba těsnění. Např. pro excentrické uzavírací klapky v kterých je použit sedlový kroužek. V těchto klapkách totiž proudí kapalná a plynná média o vysokých teplotách, které tento materiál lehce snáší. V obr. (6) na sedlový kroužek z Inconelu 718 ukazuje šipka označená číslem 3. [46]

Jiná těsnění jsou příkladně kroužky ve tvaru C, která opět zajistí odolnost proti velké teplotě proudícího kapalného média a také vysokým tlakům. Dokonce dokáží utěsnit i vakuum. Vyrábí se jako axiální statická těsnění pro vnitřní i vnější aplikaci. [47]



Obr. 6) Těsnění excentrické uzavírací klapky [46]



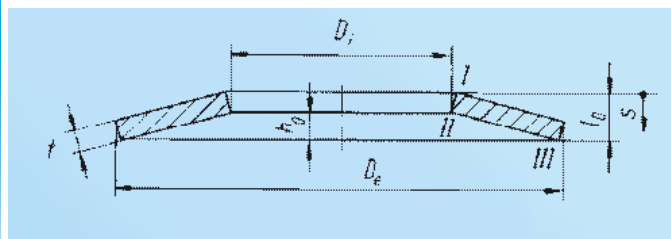
Obr. 7) Těsnění tvaru C [47]

Talířové pružiny

Tyto talířové pružiny mají obsáhlé spektrum použití, např. systémy pojistných ventilů ve velkých hloubkách pod mořem nebo naopak v satelitech putujících ve vesmíru. Jsou mělkého a kuželovitého tvaru s možností různých výřezů, vystavené statickému nebo dynamickému osovému zatížení a vyznačují se značnou únosností v malém průhybu. Mohou se také smontovat jako sady postupně na sebe podle potřeby. Fungují náročných podmínkách jako je kyselé prostředí, kde mají dlouhou životnost, a při velkém rozsahu teplot -269°C až 500°C . [48]



Obr. 8) Talířová pružina [48]



Obr. 9) Talířová pružina [48]