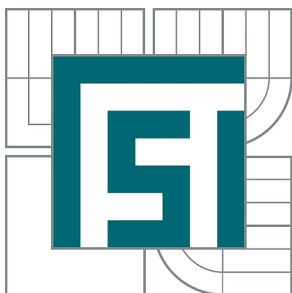


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

RACIONALIZACE VÝROBY SOUČÁSTI Z NIKLOVÉ SLITINY

RACIONALIZATION OF PRODUCTION OF COMPONENTS FROM NICKEL ALLOY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ BULA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Bula

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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

Racionalizace výroby součástí z niklové slitiny

v anglickém jazyce:

Racionalization of production of components from nickel alloy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Teoretický rozbor související problematiky.

Návrh variantní výrobní technologie zvolené součásti.

Srovnání se stávajícím stavem.

Zhodnocení a doporučení do budoucna.

Cíle bakalářské práce:

- Analýza zadané problematiky.
- Návrh a volba variantního řešení.
- Zpracování technologie výroby.
- Srovnání se stávajícím stavem výroby.
- Technicko ekonomické zhodnocení a doporučení.

Seznam odborné literatury:

1. ZEMČÍK, Oskar. Technologická příprava výroby. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
2. Springer handbook of mechanical engineering. 1st ed. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-354-0491-316.
3. DAVIM, J. Paulo. Surface Integrity in Machining. 1. vyd. London: Springer, 2010, 215 s. ISBN 978-1-84882-873-5.
4. ŠTULPA, Miroslav. CNC obráběcí stroje. 2006. vyd. Praha : BEN, 2006. 128 s. ISBN 80-7300-207-8.
5. CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

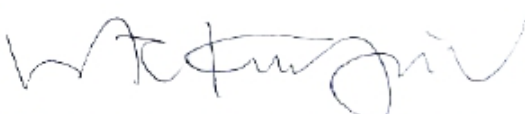
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 14.11.2013





prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá racionalizací výroby Skříně difuzoru z niklové superslitiny. Hlavní důraz je kladen na zkrácení výrobních časů operace CNC soustružení, zvolení vhodných nástrojů, vypracování technologického postupu a ekonomického zhodnocení.

Klíčová slova

VBD, CNC obrábění, keramika, břitová destička, superslitina, nikl

ABSTRACT

The Bachelor thesis deals with the racionalization of manufacturing Housing diffuser from Ni-base superalloy. The main emphasis is put on shortening production times of CNC turning, selecting appropriate tools and the development of the framework process and economic evaluation.

Key words

VBD, CNC machining, ceramic, indexable insert, superalloy, nickel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BULA, Tomáš. *Racionalizace výroby součástí z Ni slitiny*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 35 s. 4 přílohy. Vedoucí práce. Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Racionalizace výroby součástí z Ni slitiny** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

30.5 2014

Datum

Tomáš Bula

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D a Ing. Václavu Šlitrovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH	8
ÚVOD	10
1 SUPERSLITINY	11
1.1 Historie superslitin	11
1.2 Nikl	11
1.2.1 Využití niklu	11
1.3 Niklové superslitiny	12
1.3.1 Chemické složení niklových slitin	13
1.3.1 Mikrostruktura niklových superslitin.....	14
1.3.2 Přehled základních fází v niklových superslitinách.....	15
1.4 Složení a mechanické vlastnosti materiálu Inconel 718	16
1.4.1 Inconel 718	16
1.4.2 Typické oblasti použití Inconelu 718.....	17
1.4.3 Vlastnosti Inconelu 718 při obrábění.....	17
1.5 Řezné materiály pro obrábění niklových superslitin	18
2 VÝROBNÍ OPERACE SOUČÁSTI (SKŘÍŇ DIFUZORU).....	19
2.1 Technologický postup výroby součásti.....	21
3 NÁVRH VARIANTNÍHO ŘEŠENÍ OP. CNC SOUSTRUŽENÍ.....	23
3.1 Operace 4 (CNC soustružení).....	23
3.2 Operace 8 (CNC soustružení).....	24
3.3 Operace 9 (CNC soustružení).....	25
4 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ.....	27
4.1 Technické zhodnocení	27
4.2 Časové zhodnocení op. 4 a 8	27
4.2.1 Roční časová úspora op. 4	27
4.2.2 Roční časová úspora op. 8	28
4.2.3 Roční časová úspora pro op. 4 a 8	28
4.3 Ekonomické zhodnocení.....	28
4.3.1 Roční ekonomické zhodnocení nově vybraných VBD pro op. 4 a 8.....	29
4.3.2 Ekonomické zhodnocení roční výroby	29
ZÁVĚR	30

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	31
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	34
SEZNAM PŘÍLOH.....	35

ÚVOD

Téma bakalářské práce bylo vybráno z důvodu mé záliby k proudovým motorům, letadlům a celkově leteckému průmyslu. Proto mně přišlo velmi zajímavé pracovat na racionalizaci výroby součásti (Skříň Difuzoru), který je součástí proudového motoru, jehož materiál Inconel 718 je velmi těžko obrobitelný. Jedná se o niklovou superslitinu původně určenou pro vesmírné projekty, která časem našla uplatnění v civilní sféře.

V teoretické části je rozebráno, ve kterých oblastech je možné nalézt superslitinu Inconel 718, její vlastnosti při obrábění a výkonné řezné nástroje, které bývají často použity pro obrábění této niklové superslitiny.

Zaměření bakalářské práce je na zkrácení strojních časů soustružnických operací prováděné na CNC strojích a tedy i výběr nových VBD. Zaměření je také na srovnání stávajícího stavu a stavu po racionalizaci co se týká výkonnosti VBD a celkových nákladů na výrobu součásti.

Bakalářská práce byla řešena ve spolupráci s firmou-Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., která sídlí v Hlubočkách v Mariánském Údolí u Olomouce. Firma se zabývá výrobou a opravou plechových a žárových dílů, leteckých turbínových motorů z nerezavějících ocelí a speciálních slitin (hliníkových, niklových, kobaltových a titanových). Komponenty jsou dodávány pro většinu motorů a energetických jednotek společnosti Honeywell. Vyráběné komponenty lze nalézt v mnoha dopravních letadlech typu Boeing a Airbus, v helikoptérách a obchodních letadlech typu Dassault, Falcon, Cezena Citation a dalších.

1 SUPERSLITINY

Superslitiny jsou teplotně odolné slitiny niklu, železa-niklu a kobaltu, které se často používají v místech, kde teplotní podmínky přesahují 550 °C. Nicméně některé superslitiny jsou používány v oblastech, kde teplota přesahuje 85 % jejich počínající teploty tání. Je tedy zapotřebí, aby se slitiny vyznačovaly vysokou pevností, dobrou odolností proti tečení a únavy, dobrou odolností proti korozi a schopnost pracovat při vyšších teplotách po delší dobu. Jejich kombinace pevnosti za zvýšené teploty a odolnosti proti degradaci povrchu je nesrovnatelná s jinými kovovými předměty. Vlastnosti superslitin přímo závisí na chemickém složení. Určují možnou pevnost materiálu i jeho korozní odolnost. K dosažení přesně požadovaných parametrů materiálu nestačí pouze kontrolovat obsah jednotlivých prvků, ale rozhodující je tepelné zpracování [1].

1.1 Historie superslitin

Termín superslitina byl prvně použit krátce po 2. světové válce, aby popsal skupinu slitin, které byly vynalezeny pro použití u turbokompresorů a leteckých turbínových motorů. Z tohoto důvodu byl veliký požadavek na materiál, který by disponoval vysokými mechanickými vlastnostmi za vysokých teplot [1]. V roce 1940 byla patentována ve Velké Británii první niklová superslitina NIMONIC. V dalších letech bylo hlavní snahou dosáhnout vyššího objemového podílu zpevňující fáze γ' ve struktuře a snížit obsah nežádoucích křehkých fází. S vyšším objemovým podílem γ' fáze však klesá tvárnost a proto je nezbytné slitinu odlévat. Jednou z nejdůležitějších aplikací jsou lopatky rotorů turbín, u kterých jsou požadované dobré creepové vlastnosti. Ty se v posledních desetiletích výrazně zlepšily díky technice usměrněné krystalizace odlitků. Získala se tak struktura krystalů orientovaných ve směru osy lopatky. S rozvojem slévárenských technologií se začaly vyrábět monokrystaly, které díky absenci hranic zrn mají vynikající creepové vlastnosti a posunuly tak provozní teploty znatelně výše [2].

1.2 Nikl

Nikl je stříbrošedý feromagnetický lesklý kov. Jeho atomové číslo má hodnotu 28 a nachází se v 10 skupině a 4 periodě periodické tabulky prvků. Jako ostatní kovy je dobře kujný a tvárný. Má plošně centrovanou kubickou mřížku. Na vzduchu je stálý, ale při zahřátí má tendenci se pokrývat vrstvičkou oxidů [3]. Niklové slitiny jsou používány v různých redukčních nebo oxidačních korozních prostředích. Nikl je schopný rozpouštět v sobě větší množství legujících prvků než železo, zejména chróm, molybden a wolfram, což umožňuje jeho aplikace i v mnohem agresivnějších prostředích než je tomu u nerezavějících ocelí [4].

1.2.1 Využití niklu

Nikl se často používá k povlakování, díky své velmi dobré odolnosti proti atmosférické korozi, která je dána tvorbou kompaktní pasivní ochranné vrstvy. Také je použit v mnoha kovových slitinách např. Hastelloy, Inconel atd. Dále se nikl používá k výrobě galvanických článků a bývá často použit jako antikorozní ochrana [3].

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti Ni [4].

Relativní atomová hmotnost:	58,71 g/mol
Hustota:	8.9 kg/m ³
Bod tání:	1453 °C
Teplota Curieho bodu:	357 °C
Měrný elektrický odpor:	69,3 nΩ.m

Tab. 2 Mechanické vlastnosti čistého Ni [4, 5].

Mez kluzu (Re):	148 MPa
Mez pevnosti (Rm):	462 MPa
Tvrdost:	700 HB
Modul pružnosti v tahu (E):	204 GPa

1.3 Niklové superslitiny

Intenzivní vývoj slitin za posledních pár desetiletí vedl ke vzniku slitin, které jsou schopné odolávat průměrným teplotám kolem 1050 °C. Některé z nich jsou však schopné odolávat teplotám kolem 1200 °C, což je v podstatě bod tání u 90 % materiálu.

Jako hlavní přednost superslitin, zejména niklových, lze chápat jejich tepelnou odolnost a schopnost si udržet mechanické a chemické vlastnosti i při vysokých teplotách, vysoký bod tání, značná korozní odolnost včetně odolnosti vůči tvorbě oxidů, odolnost vůči teplotním šokům a creepu [6].

Niklové superslitiny lze rozdělit do 3 skupin (viz obr. 1):

Monely – slitiny Ni + (30 až 32 %) Cu

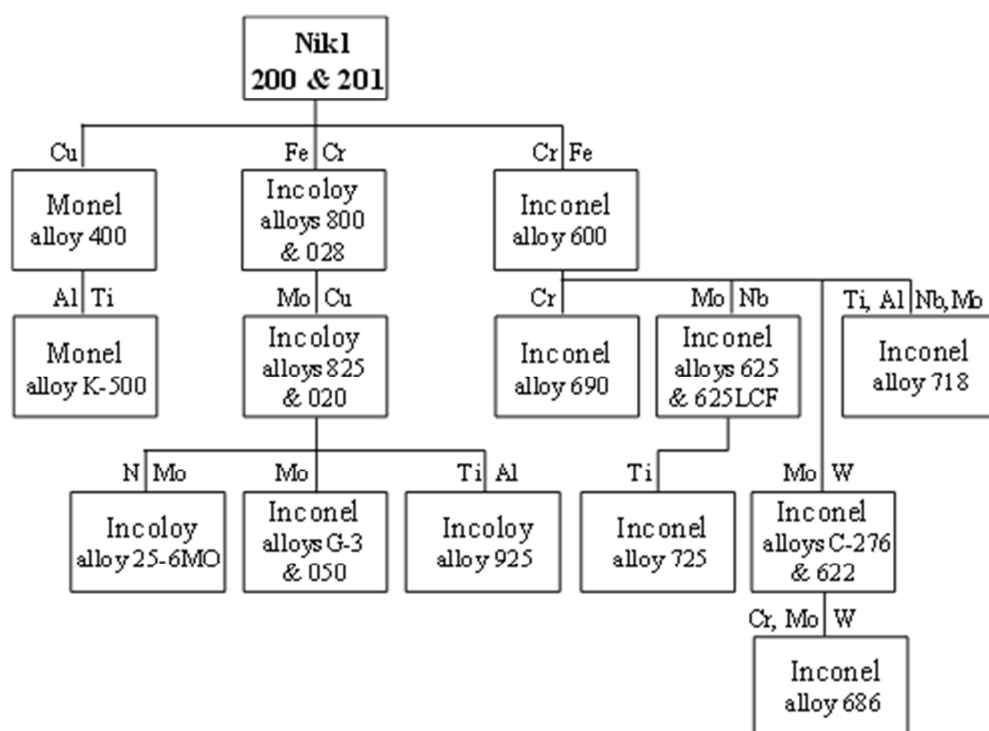
Tyto slitiny vykazují vysokou korozní odolnost na vzduchu, ve vodě, včetně mořské vody a neorganickým kyselinám. Používají se především při stavbě lodí, v ropných rafineriích a farmaceutickém průmyslu.

Inconely – slitiny Ni + (16 až 29 %) Cr + (6 až 19,5 %) Fe, případně Mo (13 až 16 %)

Používají se v silně oxidačních prostředích. Odolávají kyselině solné. Pro zvýšení korozivzdornosti jsou dále modifikovány Mo, popř. Cu.

Incoloy - slitiny Ni + (cca. 5 %) Mo + (cca. 20 %) Cr + (cca. 30 %) Fe.

Odolávají vysoce koncentrované kyselině sírové. Jejich náchylnost k mezikrystalické korozi se snižuje dolegováním Ti, Nb a Cu [7].



Obr. 1 Rozdělení niklových slitin [7].

1.3.1 Chemické složení niklových slitin

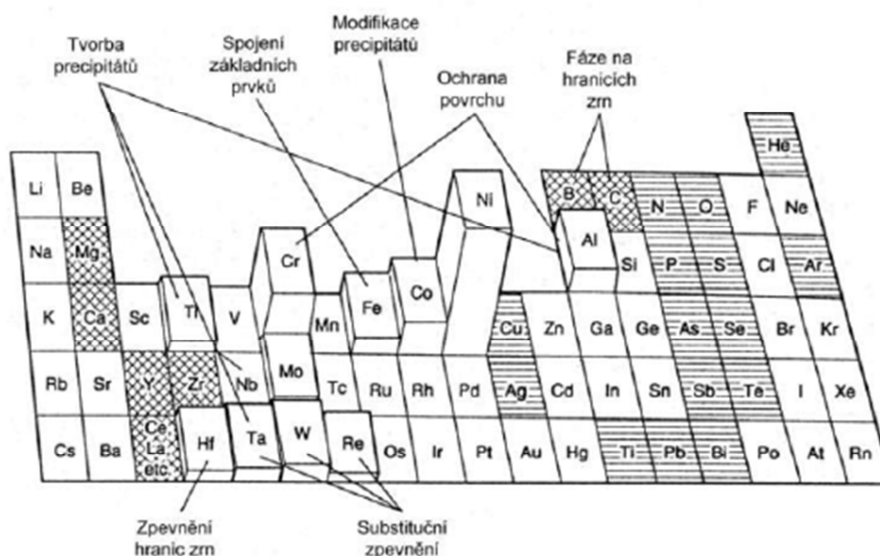
Jednotlivé prvky ve větší či menší míře ovlivňují mechanické vlastnosti i chování v korozním prostředí. Niklové superslitiny jsou komplexně legovány a existuje velké množství jejich kombinací k dosažení ideálních vlastností. Hlavním prvkem, jak sám název vypovídá, je nikl. Přísadovými prvky jsou chrom, kobalt, hliník, titan, niob a další (viz obr. 2).

Pokud se ve slitině vyskytuje železo, mluvíme o slitinách na bázi Fe-Ni. Železo je do matrice přidáváno především z ekonomických důvodů, neboť nikl je deficitním prvkem a tudíž i velmi drahým. Obsahy prvků jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Běžné obsahy prvků v Ni a Ni-Fe slitinách [8].

Prvek	Al	Cr	Co	Fe	Mo, W	Ta	Ti	Re	C
Obsah [hm. %]	0-6	5-25	0-20	0-36	0-12	0-12	0-6	0-6	0,02-0,38

Je snaha držet obsah uhlíku na co možná nejnížší hladině, aby množství karbidů bylo také nízké. Při dlouhodobějším provozu se můžou karbidy seskupovat na hranicích zrn, což je nepřijatelné z hlediska udržení pevnostních vlastností za vysokých teplot. V neposlední řadě se snižuje korozní a oxidická odolnost díky nižšímu obsahu Cr v matrici [8].

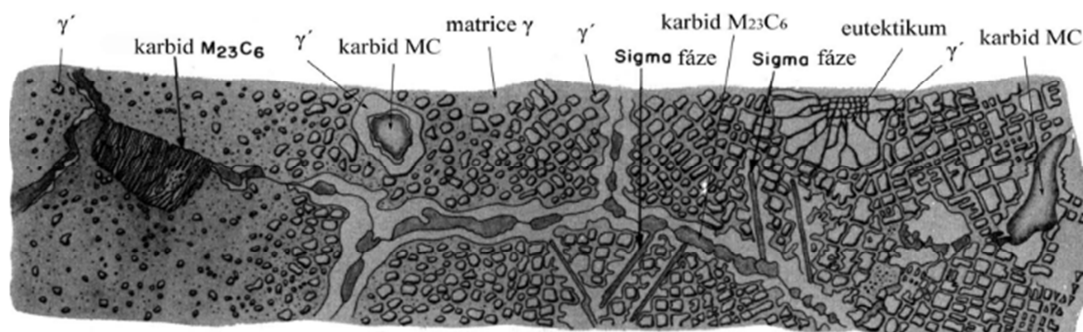


Obr. 2 Vliv přísadových prvků na vlastnosti a tvorbu fází v Ni superslitinách [9].

Během procesu výroby a tepelného zpracování se do slitin dostávají další prvky, které mohou být přínosem, ale i takové prvky, které nejsou prospěšné. Jednoznačně nežádoucími prvky jsou fosfor a síra a kovové nečistoty (Bi, Sb, Pb, Cu, Te, Ag). Prospěšnými prvky jsou (B, Zr, Hf), které přispívají ke zpevnění hranic zrn [9].

1.3.1 Mikrostruktura niklových superslitin

Mikrostruktura niklové superslitiny je tvořena maticí γ , která má kubickou plošně středěnou mřížku. S touto fází jsou koherentně spojeny částice vytvřující fáze γ' (Ni_3Al nebo $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$). Vylučují se také primární karbidy (MC), sekundární karbidy (M_{23}C_6 , M_6C , M_7C_3) nebo boridy a karbonitridy (M_3B_2 , $\text{M}_{23}(\text{C}, \text{N})_6$). K získání co nejlepších vlastností materiálu je důležitá eliminace vylučování nežádoucích fází, které se vylučují za vysokých teplot. Svou morfologií mohou způsobit zkřehnutí struktury a jiné zhoršení vlastností materiálu. Zamezit tvorbě těchto fází můžeme vhodnou volbou chemického složení. Obrázek 1 zobrazuje historický vývoj mikrostruktury niklové superslitiny, ve kterém můžeme vidět, jak se postupně měnilo množství a tvar fáze γ' . Dále na obrázku 3 jsou vyznačeny příklady žádoucích (matice γ , fáze γ' , karbidy MC, M_{23}C_6) i nežádoucích fází (eutektikum, σ fáze) [10].



Obr. 3 Vývoj mikrostruktury precipitačně zpevněných niklových superslitin (z leva doprava) [11].



Obr. 4 Mikrostruktura niklových superslitin [12].

1.3.2 Přehled základních fází v niklových superslitinách

Matrice γ

Fáze γ je u niklových superslitin základní strukturní složkou. Je to substituční tuhý roztok Ni a legujících prvků. Má kubickou plošně středěnou mřížku (FCC). Nejčastěji se leguje prvky Co, Fe, Cr, Mo a W. Z hlediska zpevnění matrice jsou nejdůležitějšími prvky Ta, Nb, Ti a Al [13].

Základní vytvrzující fáze γ'

V niklových superslitinách je nejdůležitější strukturní součást zpevňující fáze γ' , neboť zajišťuje výborné vlastnosti za velmi vysokých teplot. Je to intermetalická fáze Ni_3Al s možností náhrady Al za jiné prvky (Ti). Vzniká ochlazováním základního tuhého roztoku γ , kde se vylučuje ve formě uspořádaného tuhého roztoku s mřížkou FCC. Vniká i během provozu při změně teplot. Fáze γ' může precipitovat ve tvaru globulí, krychlí nebo tyčinek. Tento tvar určuje deformační a povrchová energie [13].

Vytvrzující fáze γ''

Základní zpevňující fáze Ni_3Nb ve speciálních slitinách (Inconel 718). Metastabilní fáze precipituje jako koherentní diskovité částice. Fáze γ'' má mřížku BCT (tetragonální prostorově centrovaná) [14].

1.4 Složení a mechanické vlastnosti materiálu Inconel 718

Tab. 4 Složení materiálu Inconel 718 [15].

Inconel 718	Prvek (v % hmotnosti)							
	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Cu
	50-55	17-21	zůstatek	2,8-3,3	4,75-5,5	1	0,35	0,2-0,8
	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. 5 Mechanické vlastnosti Inconel 718 [16].

Mez kluzu (Re):	829-1393 MPa
Mez pevnosti (Rm):	1117-1551 MPa
Tvrdost:	24-45 HRC
Prodloužení v tahu:	16-31 %

Tab. 6 Fyzikální vlastnosti Inconel 718 [17].

Hustota:	8.19 g/cm ³
Bod tání:	1336 °C
Koeficient roztažnosti:	13.0 μm/m.°C
Modul pružnosti v tahu:	204.9 GPa

1.4.1 Inconel 718

Mikrostruktura Inconelu 718 zahrnuje austenitickou matici (nazývanou γ), ve které jsou rozpuštěny další sekundární fáze. Podstatou zpevnění je precipitace fáze γ'' . Tato fáze vytváří lamely, které jsou koherentní s austenitickou maticí. Intermetalická fáze γ'' (Ni₃Nb) má tetragonální strukturu. Fáze γ'' se vytváří procesem precipitačního vytvrzování. Tento proces zahrnuje rozpouštěcí žíhání při teplotě 970-1175 °C, které probíhá ve vakuu nebo v inertní atmosféře po kterém následuje jeden nebo více precipitačních ohřevů při teplotách 600-815 °C. Tento proces má za následek vznik mikrostruktury ve formě velkých zrn obsahujících precipitační fáze Ni₃Nb a dále četný výskyt karbidů na hranicích zrn [18]. Inconel 718 Vzhledem k vysokému obsahu chrómu a dalších legujících prvků, je velmi odolný vůči korozi a je vhodný pro práci ve velmi horkém a agresivním prostředí. Tato slitina zachovává vynikající mechanické a chemické vlastnosti při vysokých teplotách. Při zahřátí, Inconel vytvoří na povrchu stabilní vrstvu oxidů, která chrání povrch před dalším útokem. Inconel je dobře tepelně zpracovatelný s možností získání velmi dobrých mechanických vlastností a to především tvrdost a pevnost [19].

1.4.2 Typické oblasti použití Inconelu 718

Jedná se o velmi častou používanou niklovou superslitinu a obvykle tvoří 50 % hmotnosti tryskového motoru. Mezi letecké komponenty patří především spalovací komory a části turbín, z důvodu, že v těchto místech se dosahuje nejvyšších teplot při provozu motoru [20]. Mezi další použití patří na příklad turbodmychadla, kryty motorů, výfukové systémy, tlakové nádoby a najdou své uplatnění také v parních generátorech [21].

1.4.3 Vlastnosti Inconelu 718 při obrábění

IN 718 je velice obtížné obrábět především díky své tvrdosti, nízké tepelné vodivosti, abrazivitě a tendenci se zpevňovat. Po prvním kontaktu nástroje s materiálem dochází k mechanickému zpevňování. Obrobený povrch součásti je v průběhu řezu mírně deformován působením plastické deformace, a tedy je podstatně tvrdší než materiál původní. To má za následek tvoření otěrových vrubů na řezném nástroji při následném obrábění. Tento problém se dá redukovat použitím VBD s pozitivní geometrií břitu, z důvodu snížení energie na obrábění. Doporučené velikosti úhlů jsou uvedeny v tabulce 6. Tím lze dosáhnout plynulého procesu tvorby třísky a omezení kolísání řezných sil. Další negativní vlastností materiálu pro obrábění je tažnost, která se s rostoucí teplotou zvyšuje, např. při 800 °C dosahuje Inconel 718 tažnosti již 28 %, což mimo jiné přispívá k vyššímu zatížení břitu nástroje při řezání [18].

Další problém, který se vyskytuje při obrábění této slitiny, je v odvodu tepla z místa řezu. Teplo vzniká tehdy, když kov při řezání deformuje materiál obrobku, kde část tepla je odvedena třískou utvářenou při řezacích procesech. Žáruvzdorné materiály však produkují dělené třísky, které tuto funkci často neplní příliš dobře. Žáruvzdorné materiály jsou navíc samy o sobě špatnými vodiči tepla. Teploty v řezných zónách mohou dosáhnout až 1 100–1 300 °C a pokud nelze teplo odvádět, zvyšuje se teplota nástroje a obrobku. Výsledkem je kratší životnost nástroje, případně i deformace obrobku a změny jeho metalurgických charakteristik [22].

Tab. 7 Doporučená geometrie nástroje [23].

Úhel	Hrubování	Dokončování
Úhel hřbetu (α_o)	0°	8°
Úhel čela (γ_o)	6°	8°
Úhel sklonu ostří (λ_s)	6°	8°
Úhel nastavení hl. ostří (κ_r)	do 45°	do 45°

1.5 Řezné materiály pro obrábění niklových superslitin

Řezný materiál při obrábění slitiny jako je Inconel 718 musí být tvrdší nežli vlastní obráběný materiál. Mezi nejvýkonnější řezné materiály pro obrábění niklových superslitin patří řezná keramika a kubický nitrid bóru (CBN) [24].

Kubický nitrid bóru (CBN)

Jedná se o vůbec jeden z nejtvrdších řezných materiálů na trhu. Tvrdost CBN se blíží tvrdosti diamantu a vyrábí se za vysokých teplot a tlaků. CBN vhodný pro obrábění materiálů, které diamantem opracovávat nelze. Svými vlastnostmi je tento řezný materiál předurčen pro obrábění materiálů s obsahem železa o tvrdosti od 45 HRC, stejně jako šedé a tvrzené litiny, i těžkoobrobitelných materiálů s vysokým podílem kobaltu a niklu. Na rozdíl od diamantu má CBN vyšší chemickou stálost a tepelnou odolnost do 1 200 °C [24].

Řezná keramika

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 velkou tvrdost, chemickou stálost a nízkou tepelnou vodivost což je bráno jako výhodou, naopak se vyznačují velkou křehkostí a malou pevností v ohybu, nejsou proto vhodné k obrábění přerušovaným řezem. Jejich použití je možné při teplotách řezání až 1 200 °C. Po otupení všech řezných hran se již neostří a dále se nepoužívá [25].

Existují čtyři základní typy řezné keramiky:

- Oxidová keramika- - je vytvořena na bázi oxidu hlinitého, obsahuje až 99,9 % Al_2O_3 .
- Směsná keramika- je vytvořena na bázi Al_2O_3 s přísadami TiN a TiC.
- Neoxidická keramika- je vytvořena na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 .
- Vyztužená keramika- obsahuje tzv. whiskery, to jsou vlákna křemíku o průměru do 1 μm a délce do 100 μm [26].

Pro účely obrábění Inconelu 718 je preferována zejména řezná keramika, jejíž složení je na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 [15].

2 VÝROBNÍ OPERACE SOUČÁSTI (SKŘÍŇ DIFUZORU)

V této části práce je popsán základní sled operací podílející se na výrobě součásti.



Obr. 5 Skříň Difuzoru-přední/zadní pohled.

Na výrobě součásti (viz obr. 5) se podílejí nejen operace soustružení, frézování a broušení, ale také operace jako jsou balotínování, alkalické odmaštění, pasivace a fluorescenční kontrola o kterých je zmíněno níže.

Balotínování

Patří mezi moderní povrchové úpravy antikoročních ocelí. Podstatou této metody je otryskávání povrchu skleněným granulátem unášeným proudem vzduchu. Povrch po tryskání je sametově lesklý až sametově matný, záleží na druhu a zrnitosti použitého média. Balotínováním se sjednocuje povrch tryskaného materiálu, na kterém je různé zabarvení vzniklé po tepelné úpravě, např. po sváření. Balotínováním je upraven povrch, který je pak odolnější na omak a zvyšuje odolnost proti okysličování a tím nežádoucímu procesu měnění povrchu materiálu [27].

Pasivace

Samovolná nebo řízená tvorba ochranné vrstvy na povrchu kovu, zabraňující korozi a narušení povrchu kovu – např. tmavnutí stříbra, rezivění železa. Pasivace se dosahuje působením chemických látek nebo elektrochemickými metodami. Konkrétně u Inconelu 718 se provádí pasivace kyselinou dusičnou (HNO_3) [28].

Fluorescenční kontrola

Patří do oblasti kapilárních zkoušek, vada se projeví tak, že při ozáření ultrafialovým světlem zeleně nebo žlutozeleně fluoreskuje a tím světelně kontrastuje s tmavým okolím vady. Hodnocení se provádí v tzv. černém světle (UV). Metoda je prováděna na materiálu, svařech, výrobcích, odlitcích a výkovicích v souladu s platnými normami EN, ISO, DIN, ASME podle požadavku zákazníka nebo postupů zkoušení předložených zákazníkem [29].

Alkalické odmaštění

Používá se nejčastěji hydroxid sodný, nebo uhličitán sodný ve spojení se smáčedly při koncentracích do 10% a teplotě kolem 60°C po dobu 1-20 minut (závisí na stupni znečištění podkladu). Mastnota v roztocích emulguje (zmýdelňuje) a má snahu se usazovat na hladině nádrží, ze kterých je potřeba ji odstranit. Při odmaštění ponorem je důležité zajistit účinné proudění kapaliny, aby se netvořila pěna. Po alkalickém odmašťování následuje oplach demineralizovanou vodou [30].

Precipitační vytvrzování

Precipitační zpevnění materiálů je založeno na vylučování fází ve shlucích precipitátu, které tím významně zvýší pevnost zpracovávaného dílu.

Rozpouštěcí žíhání

Rozpouštěcím žíháním se slitina ohřeje na vhodnou teplotu. Ponecháním slitiny při této teplotě po dostatečně dlouhou dobu dojde k rozpuštění jedné či více fází do tuhého roztoku a následným dostatečně rychlým zchlazením zůstanou tyto fáze rozpuštěny v tuhém roztoku matrice. Následné procesy stárnutí při zvýšených teplotách umožní řízenou precipitaci (vyloučení) určitých fází a tím i dosažení potřebných výsledných vlastností tepelně zpracovaných dílů [31].

Vytvrzení precipitačním stárnutím

Dosažení konečných požadovaných vlastností materiálu obvykle vyžaduje, aby byl materiál dlouhodobě vystaven cyklu tepelného zpracování při nízké teplotě, čímž vzniká pro slitinu specifická mikrostruktura – tento proces se nazývá vytvrzení precipitačním stárnutím. Tento krok je obvykle proveden jako poslední výrobní operace nebo těsně před koncem výrobního procesu, protože tento dlouhodobý proces má za výsledek výrazný nárůst tvrdosti materiálu. Náklady na obrábění se mohou dramaticky zvýšit, pokud je vyžadováno obrábění po procesu stárnutí [31].

2.1 Technologický postup výroby součásti

Tab. 8 Technologické postup výroby součásti.

Číslo operace	Typ operace	Popis práce	Stroj
1	Značení dílce	Upnutí dílce a označení	Vibrační elektro pero
2	Balotinování	Balotinování okének	Pískovací kabina ITB90G
3	Konvenční soustružení	Soustružení čela a vnitřního průměru	Konvenční soustruh SU 63
4	CNC soustružení	Soustružení čela	CNC soustruh SP 30
5	Alkalické odmaštění	Odmaštění součásti	Vanový odm. stroj VOS - EKO 2000
6	Tepelné zpracování (precip. vytvrzování)	Rozpouštěcí žhání, ochlazení a stárnutí	Vakuová pec
7	Kontrola tvrdosti (Rockwell)	Ustavení dílce, kontrola a vyhodnocení	Tvrdoměr RA-1500
8	CNC soustružení	Soustružení čela, válcové plochy, zápich, sražení hr.	CNC soustruh SP 30
9	CNC soustružení	Soustružení čela a vnitřního průměru	CNC soustruh SP 30
10	Broušení	Zarovnání čela do roviny	Hrotová bruska SI 6 AX
11	Broušení	Broušení čela a válcových ploch	Hrotová bruska SI 6 AX
12	Broušení	Broušení čela	Hrotová bruska SI 6 AX
13	CNC frézování	Frézování čel lopatek, vrtání děr	CNC frézka Deckel-Maho 80
14	Konvenční frézování	Vrtání 6 otvorů, frézování zahloubení	Konzolová frézka FGS 25/32
15	Alkalické odmaštění	Odmaštění součásti	Vanový odm. stroj VOS - EKO 2000
16	Pasivace	Omaštění, oplach, ponor do HNO ₃ , oplach, kontrola	Pasivační vana
17	Ruční práce	Odjehlení po frézování	
18	Vizuální kontrola	Kontrola kusu	

19	Alkalické odmaštění	Odmaštění součásti	Vanový odm. stroj VOS - EKO 2000
20	Fluorescenční kontrola	Kontrolování kusu vůči vadám ve tmavém světle	Fluorescenční mikroskop
21	Popis dílce	Popis dílce	Vibrační elektro pero
22	Konečná kontrola	Kontrola rozměrů	3D TOPMES C3V

Náčrty jednotlivých operací jsou uvedeny v příloze 4.

Současné CNC soustružnické operace jak hrubovací, tak dokončovací jsou prováděny VBD ze slinutých karbidů, které jsou přímo určeny pro obrábění Ni-superslitin. Pro hrubovací operace jsou použity SK třídy KC 5510 a pro dokončovací operace SK třídy KC 5525 (výrobce Kennametal). Jsou to metodou PVD (fyzikální metoda nanášení povlaku na nástroj) povlakované slinuté karbidy TiAlN, schopné obrábět Ni-superslitiny řeznou rychlostí až 122 m/min [32].

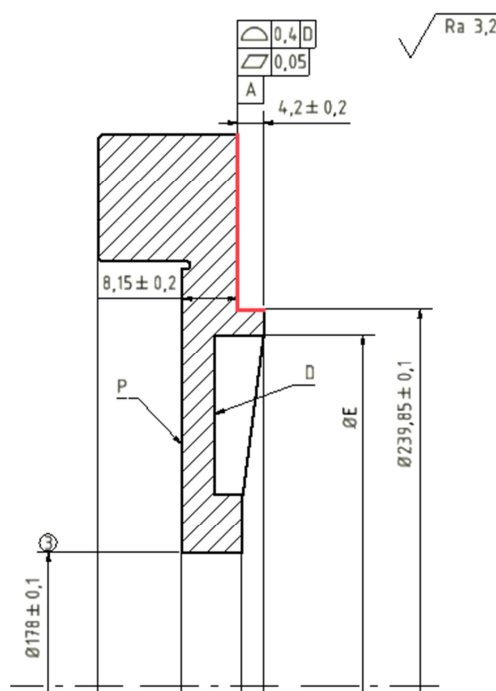
Ni-superslitiny jsou v dnešní době obráběny mnohem vyššími řeznými rychlostmi, z toho důvodu bude kladen důraz na zkrácení strojních časů soustružnických operací na CNC strojích. Pro hrubovací soustružnické operace byly nově zvoleny keramické VBD třídy KYS 25 (výrobce Kennametal). KYS 25 je vysokoteplotní keramická třída povlakovaná metodou CVD (chemická metoda nanášení povlaku na nástroj) a speciální povrchovou úpravou. Keramické VBD třídy KYS 25 jsou schopny při obrábění Ni-superslitin dosáhnout řezné rychlosti až 380 m/min [36].

3 NÁVRH VARIANTNÍHO ŘEŠENÍ OP. CNC SOUSTRUŽENÍ

Ve třetí kapitole bude věnována pozornost operacím CNC soustružení, kde budou srovnány nově navržené VBD, řezné podmínky a strojní časy se stávajícím stavem. Po důkladném hledání vhodných VBD z katalogů Seco, Pramet, Kennametal, Widia a dalších, byly nakonec vybrány keramické VBD od výrobce Kennametal. Nové VBD byly vybrány pouze pro hrubovací operace, jelikož zde byla možnost významného zkrácení strojního času. Pro dokončovací operace nebyly nalezeny výkonnější VBD než jsou stávající a tedy z toho bylo usouzeno, že VBD pro dokončovací operace jsou optimální.

3.1 Operace 4 (CNC soustružení)

1. Ustavit dílec do měkkých čelistí (11600) za Ø "3" s dorazem na čelo "P", vyrovnat házení dle Ø "3" do 0,1 mm max. a upnout.
2. Zkontrolovat házení na Ø "E". Povoleno max. 0,2 mm na Ø "E".
3. Zkontrolovat čelní házení čela "D" na třech bodech. Povoleno max. 0,2 mm.
4. Soustružit čelo do hloubky $4,2 \pm 0,2$ mm na Ø $239,85 \pm 0,1$, po přídavicích 0,6 mm, s přídavkem 0,6 mm na dokončení.
5. Dílec odjehlit, uvolnit a odložit.



Obr. 6 Hrubování čela.

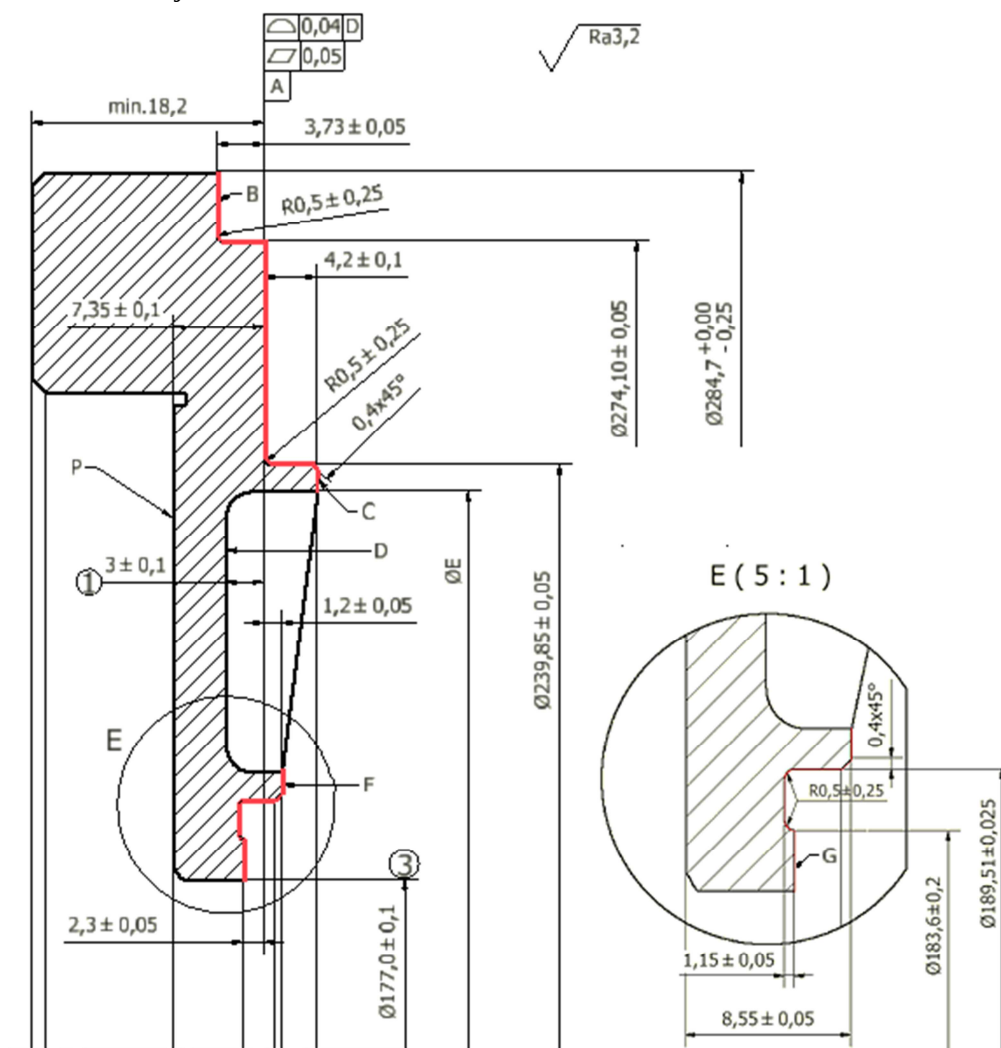
Tab. 9 Srovnání VBD pro operaci 4.

Řezné podmínky	Stávající hrubovací VBD (Kennametal/SK)	Nově zvolené hrubovací VBD (Kennametal/keramika)
	WNMG MS 080408 KC5510	WNGA 080408 T01020 KYS 25
Vc [m/min]	40	300
f [mm/ot]	0,2	0,12
Ap [mm]	0,6	0,6
t _{AS} [mm]	11	2

Po simulaci op. 4 v programu SurfCAM bylo zjištěno, že novými keramickými destičkami WNGA 080408 T01020 KYS 25 bylo ušetřeno **9 minut** z výrobního času. Porovnání výkonnosti stávajících a nově zvolených VBD (viz příloha 3).

3.2 Operace 8 (CNC soustružení)

1. Ustavit dílec do měkkých čelistí (11600) za $\varnothing$ "3" s dorazem na čelo "P", vyrovnat házení dle $\varnothing$ "3" do 0,1 mm max. a upnout.
2. Zkontrolovat házení na $\varnothing$ "E". Povoleno max. 0,2 mm na $\varnothing$ "E".
3. Zkontrolovat čelní házení čela "D" na třech bodech - povoleno max. 0,2 mm.
4. Hrubovat čelo A s přídavkem na dokončení 0,3 mm.
5. Hrubovat čelo B do hloubky $3,73 \pm 0,05$ mm na $\varnothing 274,1 \pm 0,05$ mm po přídavicích 0,6 mm a přídavkem na dokončení 0,3 mm.
6. Dokončit čelo B, soustružit rádius $R0,5 \pm 0,25$ mm na $\varnothing 274,1 \pm 0,05$ mm, dokončit čelo A, soustružit rádius $R0,5 \pm 0,25$ mm na $\varnothing 239,85 \pm 0,05$ mm, srazit hranu $0,4 \times 45^\circ$ a zarovnat čelo C, kontrolovat rozměr "1". Soustružit čelo F na rozměr $8,55 \pm 0,05$ mm. Soustružit čelo G na rozměr $2,3 \pm 0,05$ mm. Soustružit drážku do hloubky $1,15 \pm 0,05$ mm od $\varnothing 183,6 \pm 0,2$ mm po $\varnothing 189,51 \pm 0,025$ mm.
7. Dílec odjehlit, uvolnit a odložit.



Obr. 9 Hrubovací, dokončovací operace a detail drážky E.

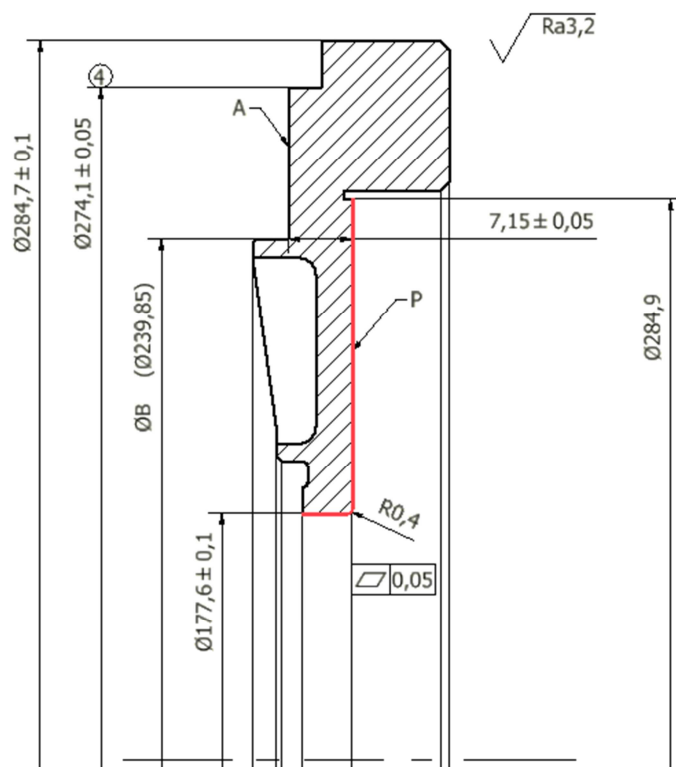
Tab. 10 Srovnání VBD pro operaci 8 (hrubování).

Řezné podmínky	Stávající VBD (Kennametal /SK)	Nově zvolená VBD (Kennametal/keramika)
	WNMG 080408 MS KC5510	WNGA 080408 T01020 KYS 25
Vc [m/min]	40	300
f [mm/ot]	0,1	0,12
Ap [mm]	0,6	0,6
t _{AS} [mm]	8,04	1,46

Po simulaci op. 8 v programu SurfCAM bylo zjištěno, že novými keramickými destičkami WNGA 080408 T01020 KYS 25 bylo ušetřeno **6,58 minut** z výrobního času.

3.3 Operace 9 (CNC soustružení)

1. Ustavit dílec do měkkých čelistí (11600) za Ø "B" s dorazem na čelo "A", vyrovnat házení na Ø "4" do 0.02mm a upnout.
2. Soustružit čelo P na rozměr $7,15 \pm 0,05$ mm po přídavicích 0,1 mm. Soustružit R0,4 a vnitřní Ø $177,6 \pm 0,1$ mm.
3. Dílec odjehlít, uvolnit a odložit.



Obr. 10 Dokončovací operace čela P a vnitřního průměru.

Při této operaci zůstává na dokončení 0,2 mm materiálu, přesto tloušťka je obráběna na dvakrát, tedy po třísce 0,1 mm z důvodu zabránění vnesené energie a tedy předejití nežádoucí deformaci.

Tab. 11 Řezné podmínky pro stávající VBD pro op. 9.

Řezné podmínky	Stávající VBD (Widia/karbid)
	WNMG 080408-4 TN8025
Vc [m/min]	40
f [mm/ot]	0,1
Ap [mm]	0,1
t _{AC} [min]	16

4 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ

Technicko ekonomické zhodnocení výroby součásti Skříň Difuzoru pro 75ks/rok. Zhodnocena bude pouze operace 4 a 8, jelikož na operaci 9 neproběhly žádné změny a lze předpokládat, že je optimální.

4.1 Technické zhodnocení

Použitím keramických VBD odpadnulo chlazení a byla zvýšena řezná rychlost ze 40 m/min na 300 m/min. Je to převážně z důvodu, že keramika má větší odolnost proti otěru než SK a snáší mnohem vyšší teploty. Šířka záběru ostří 0,6 mm je stejná jak pro VBD z SK tak i keramiky. Taková šířka záběru ostří byla zvolena na základě poloměru špičky VBD. Pokud by šířka záběru ostří byla větší než poloměr špičky, tak při soustružení rohů by se začal tvořit lem na hřbetě VBD, který přispívá k porušení nástroje křehkým lomem.

4.2 Časové zhodnocení op. 4 a 8

V této části je rozebrána časová úspora, které jsme dosáhli použitím nově zvolených keramických VBD.

4.2.1 Roční časová úspora op. 4

Po simulaci op. 4 v programu SurfCAM bylo zjištěno, že díky nově zvoleným keramickým destičkám WNGA 080408 KYS 25 bylo ušetřeno 9 minut z výrobního času.

$$T_{Op4} = t_{u4} \cdot n_r [min] \quad (4.1)$$

kde: $T_{Op4}[min]$ - roční časová úspora pro op. 4,
 $t_{u4}[min]$ - ušetřený čas,
 $n_r[ks]$ - počet kusů za rok.

$$T_{Op4} = 9 \cdot 75 = 675 min$$

Vzhledem k výrobnosti 75 ks/rok, tak použitím keramických VBD bylo ušetřeno 675 min strojního času za rok.

4.2.2 Roční časová úspora op. 8

Po simulaci op. 8 v programu SurfCAM bylo zjištěno, že novými keramickými VBD WNGA 080408 KYS 25 bylo ušetřeno 10 minut z výrobního času.

$$T_{Op8} = t_{u8} \cdot n_r \text{ [min]} \quad (4.2)$$

kde: T_{Op8} [min] - roční časová úspora pro op. 8,
 t_{u8} [min] - ušetřený čas pro op. 8,
 n_r [ks] - počet kusů za rok.

$$T_{Op8} = 6,58 \cdot 75 = 493,5 \text{ min}$$

Použitím keramických destiček v operaci 8 bylo ročně ušetřeno 493,5 min/rok.

4.2.3 Roční časová úspora pro op. 4 a 8

$$T_{Op} = T_{Op4} + T_{Op8} \text{ [min]} \quad (4.3)$$

kde: T_{Op} [min] - roční časová úspora pracoviště pro op. 4 a 8,
 T_{Op8} [min] - roční časová úspora pro op. 8,
 T_{Op4} [min] - roční časová úspora pro op. 4.

$$T_{Op} = 675 + 493,5 = 1168,6 \text{ min} \dots 19 \text{ hod a } 28 \text{ min}$$

Použitím keramických VBD bylo pro op. 4 a 8 dosaženo roční časové úspory 19hod a 28min.

4.3 Ekonomické zhodnocení

Pro hrubovací operace byla zvolena keramická břitová destička oboustranná se 6 břity z důvodu co možno nejefektivnějšího využití.

Ze zkušeností z výroby je ověřeno, že spotřeba stávající břitové destičky a nově zvolené keramické je stejná. Tedy břit řezných destiček se musí po každé třísce měnit z důvodu zamezení značného otupení destiček a tedy předejití vnesení velké energie do materiálu a jeho následnou deformaci.

Přesná cena řezných destiček nemohla být zveřejněna, a tedy se bude pracovat pouze s jejím cenovým rozdílem.

4.3.1 Roční ekonomické zhodnocení nově vybraných VBD pro op. 4 a 8

Jelikož spotřeba obou VBD z SK i keramiky je stejná vyšlo, že je vynaloženo 6 břitů, neboli 1 destička na obrobení operace 4. Pro obrobení operace 8, je potřeba 4 břitů.

Cenový rozdíl břitových destiček.....76,2 Kč

Cenový rozdíl břitových destiček na břit.....12,7 Kč

Cenový rozdíl břitových destiček na op. 4 a 8.....127 Kč

$$C_{VBD} = C_{Br} \cdot n_r [Kč] \quad (4.4)$$

kde: $C_{VBD} [Kč]$ - celkový roční cenový rozdíl destiček pro op. (4,8),
 $C_{Br} [Kč]$ - cenový rozdíl břitových destiček pro op. (4,8),
 $n_r [ks]$ - počet kusů za rok.

$$C_{VBD} = 127 \cdot 75 = 9525 \text{ Kč}$$

Roční cenový rozdíl destiček pro op. (4,8) je 9525 Kč.

4.3.2 Ekonomické zhodnocení roční výroby

$$C_{op4,8} = H_s \cdot T_{OP} [Kč] \quad (4.5)$$

kde: $H_s [Kč]$ - hodinová sazba pracoviště,
 $T_{OP} [Kč]$ - roční časová úspora pracoviště pro op. 4 a 8,
 $C_{op4,8} [Kč]$ - celková roční finanční úspora pracoviště pro op. 4 a 8.

$$C_{op4,8} = 623 \cdot 19 \text{ hod a } 28 \text{ min} = 12\,128 \text{ Kč}$$

Na základě zkrácení strojních časů v obou operacích bylo za rok ušetřeno 12 128 Kč.

$$C_{cel} = C_{op4,8} - C_{VBD} [Kč] \quad (4.6)$$

kde: $C_{op4,8} [Kč]$ - celková roční úspora pracoviště pro op. 4 a 8,
 $C_{VBD} [Kč]$ - celkový roční cenový rozdíl destiček pro op. 4 a 8,
 $C_{cel} [Kč]$ - celková úspora výroby

$$C_{cel} = 12\,128 - 9\,525 = 2\,603 \text{ Kč}$$

Na základě výpočtů bylo zjištěno, že díky zkrácení strojních časů a patřičnému cenovému rozdílu stávajících a nově zvolených VBD v operacích 4 a 8 bylo ročně ušetřeno 2 603 Kč.

ZÁVĚR

V této bakalářské práci byla provedena racionalizace výroby součástí z Ni-superslitiny Inconel 718. Racionalizace byla soustředěna na soustružnické hrubovací operace prováděné na CNC soustruzích, kde byla snaha o snížení strojních časů a ekonomicky zvýhodnit výrobu.

Nahrazením stávajících VBD z SK nově zvolenými keramickými VBD pro hrubovací soustružnické operace bylo dosaženo pro roční výrobu (75 ks) těchto výsledků:

- Použitím keramických VBD, bylo dosaženo roční zkrácení strojního času o 19 hod a 28 min. Když bereme v potaz, že hodinová sazba stroje je 623 Kč, tak díky této časové úspoře pracoviště bylo ušetřeno za rok 12 128 Kč.
- Z důvodu ekonomické výhodnosti byly vybrány keramické VBD se 6 břity. Jelikož spotřeba stávajících a nově zvolených VBD je stejná, tak roční spotřeba VBD pro hrubovací soustružnické operace je 125 ks.
- Jelikož zvolení nových keramických VBD se prodražilo o 76,2 Kč na kus, tak roční náklady na VBD stouply o 9 525 Kč.
- Z celkových výpočtů vyplynulo, že i přes to, že nově zvolené keramické VBD se prodraží, tak díky rapidnímu zkrácení strojních časů firma ročně ušetří 2603 Kč.
- Časovou roční úsporou 19 hod a 28 min je možnost využití pracoviště pro jinou výrobu.

V závěru bych doporučil, z důvodu extrémně nízké trvanlivosti keramických VBD, provést testy a zjistit Taylorovu závislost řezné rychlosti na trvanlivosti a stanovit tak lepší poměr z hlediska trvanlivosti VBD.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SUPER ALLOYS PART 1. *MATERIALS AND METALLURGY* [online]. 2013 [vid. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://iambzu.blogspot.cz/2013/03/super-alloys-part-1.html>
- [2] STANOVENÍ ZKRÁCENÝCH CYKLICKÝCH DEFORMAČNÍCH KŘIVEK SUPERSLITINY INCONEL 738LC PŘI ZVÝŠENÝCH TEPLITÁCH. Brno, 2008. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7056. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ.
- [3] PAŘÍZEK, Ladislav. *Nikl a jeho sloučeniny* [online]. Brno, 2011 [vid. 2014-05-23]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/3014/bakalarka.pdf?sequence=1>. Bakalářská. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce RNDr. IVANA PILÁTOVÁ, CSc.
- [4] Nikl. In: *Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství* [online]. 2007 [vid. 2014-05-23]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/soubory/KOVYII_Ni_VT_IMC.pdf
- [5] Nikl. [Http://www.prvky.com/28.html](http://www.prvky.com/28.html) [online]. 2013 [vid. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/28.html>
- [6] Y.B. Guo, W. Li, I.S. Jawahir *Surface Integrity Characterization and Prediction in Machining of Hardened and Difficult to Machine Alloys: a State-of-Art Research Review and Analysis* Mach. Sci. Technol., 13 (2009), pp. 437–470
- [7] VYSOKOPEVNÉ A VYSOKOLEGOVANÉ OCELI, SUPERSLITINY. In: *VYSOKOPEVNÉ A VYSOKOLEGOVANÉ OCELI, SUPERSLITINY* [online]. 2012 [vid. 23.5 2014]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/01_pm_vyskopevne_a_vysokolegovane_oceli_a_slitiny_ni_a_co.pdf
- [8] VLIV AL A AL-SI VRSTVY NA ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI NIKLOVÉ SUPERSLITINY IN713LC ZA TEPLITY 800°C [online]. Brno, 2011 [vid. 2014-05-24]. Dostupné z: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:_vEkdpdiszoJ:https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/6493/2011_BP_Sulak_Ivo_116129.pdf%3Fsequence%3D1+%&cd=3&hl=cs&ct=clnk&gl=cz. Bakalářská. VUT FSI. Vedoucí práce Prof. Ing. TOMÁŠ PODRÁBSKÝ CSc
- [9] NĚMEC, K.: *Vliv podmínek zatěžování na strukturu a vlastnosti litých niklových superslitin*. Disertační práce, VUT Brno 2005.
- [10] BRADLEY, E. F.: *Superalloys – Technical Guide*, ASM International, 1998
- [11] DAVIS, J. R. *ASM Speciality Handbook: Nickel, Cobalt, and their Alloys*. ASM International, Ohio, USA, 2000. 421 p. ISBN 0-87170-658-7.
- [12] Prof. Ing. Tomáš PODRÁBSKÝ, CSC. *Strojírenské materiály: Kovové materiály*. In: *Strojírenské materiály* [online]. 2009 [vid. 23.5 2014]. Dostupné z: <http://www.primat.cz/moje-materialy/detail/24996?seoId=vutbr-fme&fid=3fpn#notify>

- [13] VZTAH MEZI STRUKTUROU A VLASTNOSTMI LITÝCH NIKLOVÝCH SLITIN [online]. BRNO, 2008 [vid. 2014-05-23]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/4242/2008_BP_Jana_Smekalova_84849.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce prof. Ing. TOMÁŠ PODRÁBSKÝ, CSc.
- [14] DURAND-CHARRE, M.: The Microstructure of Superalloys. Gordon & Breach Science Publishers, Amsterdam, 1997. 121 s.
- [15] Obrábění materiálů typu Inconel 718. Plzeň, 2012. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2621/Obrabeni%20materialu%20typu%20Inconel%20718%20-%20Petr%20Kocian.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
- [16] INCONEL® alloy 718. [Http://www.specialmetals.com](http://www.specialmetals.com) [online]. 2008 [vid. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/products/inconelalloy718.php>
- [17] Inconel 718 – Composition, Properties and Applications of Inconel 718 Nickel-Chromium Alloy by Alloy Wire International. [Http://www.azom.com](http://www.azom.com) [online]. 2013 [vid. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4198#Inconel718%E2%80%93>
- [18] Vrtání děr se zvýšenou přesností. [Http://www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com) [online]. 2011 [vid. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vrtani-der-se-zvysenou-presnosti.html>
- [19] The essential material characteristics of Inconel 718. Secotools [online]. [vid. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/en/Global/Segment-Solutions/Aerospace-Solutions/AS-Material-main/Heat-resistant-super-alloys/Inconel-71874/>
- [20] POLLOCK, Tresa m a Sammy TIN. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties. Journal of propulsion and power [online]. 2006, č. 2 [vid. 2012-05-16]. ISSN 0748-4658. DOI: 0748-4658. Dostupné z: <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/77223/AIAA-18239-462.pdf;jsessionid=1E5CE0BACE78AA8DFD62C32648621785?sequence=1>
- [21] Volba řezných podmínek pro obrábění superslitin s ohledem na integritu povrchu. In: [Http://stc.fs.cvut.cz](http://stc.fs.cvut.cz) [online]. 2013 [vid. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf14/4540.pdf>
- [22] Nové nástroje a strategie pro materiály ISO S. In: [Http://www.industry-eu.cz](http://www.industry-eu.cz) [online]. 2010 [vid. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.industry-eu.cz/UserFiles/File/CCZ99.pdf>
- [23] SLABÝ, Ondřej. SESTAVENÍ TECHNOLOGIE ROTAČNÍ SOUČÁSTI Z MATERIÁLU INCONEL V PODMÍNKÁCH FIRMY FRENCKEN BRNO [online]. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2009 [vid. 2014-03-19]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/9943/2009_BP_Ond%C5%99ej%20Slab%C3%BD_98881.pdf?sequence=1. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VUT BRNO. Vedoucí práce ING. MILAN KALIVODA.

- [24] PKD a CBN nástroje. *MMSpektrum* [online]. 2012 [vid. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pkd-a-cbn-nastroje.html>
- [25] HLUCHY, M., HANĚK, V. Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001, 176 s. ISBN 80-718-3245-6.
- [26] *Nové trendy v oblasti konstrukce nástrojů* [online]. Plzeň, 2012 [vid. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:dcaHT134Q6UJ:https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/9333/Jurcik.pdf%3Fsequence%3D1+%&cd=10&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>. Bakalářská. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA STROJNÍ.
- [27] Piskovani-scpmoto. *Balotina* [online]. 2014 [vid. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.piskovani-scpmoto.cz/balotina>
- [28] *Vliv pasivace povrchu na korozní odolnost svarů antikorozních ocelí* [online]. Univerzita Pardubice, 2011 [vid. 2014-05-05]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/browse?type=title&sort_by=1&order=ASC&rpp=20&etal=-1&starts_with=Vliv+pasivace+povrchu. Diplomová práce. Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [29] Metody kapilární. *Controltest* [online]. 2009 [vid. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.controltest.cz/metody-ndt/kapilarni.php>
- [30] Čištění povrchu. *Salum* [online]. 2002 [vid. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.salum.cz/index.php/salum-praskove-lakovani-praskova-lakovna-komaxitovani-komaxit-5/40-salum-preduprava-povrchu-pred-lakovanim-praskove-mokre>
- [31] Rozpouštěcí žíhání a stárnutí niklových slitin. *Bodycote* [online]. 2014 [vid. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.bodycote.com/cs-CZ/services/heat-treatment/solution-and-age/nickel-alloys.aspx>
- [32] Kennametal 2013 Master Catalog. In: *Kennametal* [online]. 2013 [vid. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.kennametal.com/en/resources/catalogs-and-literature.html>
- [33] Toolholders. In: *Iscar* [online]. 2014 [vid. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=2245&mapp=IS&app=24&GFSTYP=M>
- [34] Nástroje na zapichování a upichování. In: *Toolingcenter* [online]. 2014 [vid. 2014-05-04]. Dostupné z: <https://www.toolingcenter.com/CS/category/Hlavn%C3%AD%20katalog/Soustru%C5%BEen%C3%AD/N%C3%A1stroje%20na%20zapichov%C3%A1n%C3%AD%20a%20upichov%C3%A1n%C3%AD>
- [35] Carbide Inserts. In: *Widia* [online]. 2010 [vid. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.widia.com/en/products/30196349/64466767/64481529/64485537/38757533/23012.html>
- [36] Machining Super Alloys. *Kennametal* [online]. 2013 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.kennametal.com/en/industry-solutions/aerospace/machining-super-alloys.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
BCT	[-]	tetragonální prostorově centrovaná mřížka
CBN	[-]	kubický nitrid boru
CNC	[-]	computer numerical control
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition-chemická metoda nanášení povlaku na nástroj
FCC	[-]	kubická plošně středěná mřížka
HRC	HRC	tvrdost podle Rockwella
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition-fyzikální metoda nanášení povlaku na nástroj
SK	[-]	slinutý karbid
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A_p	[mm]	šířka záběru ostří
f	[m.ot ⁻¹]	posuv na otáčku
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
t_{AS}	[min]	strojní čas
V_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
α_o	[°]	úhel hřbetu, měřený v Nástrojové ortogonální rovině
γ_o	[°]	úhel čela, měřený v Nástrojové ortogonální rovině
γ	[-]	strukturní složka, základní tuhý roztok
γ'	[-]	strukturní složka, vytvrzující fáze Ni ₃ Al, Ni ₃ Ti, Ni ₃ (Al, Ti)
γ''	[-]	strukturní složka, vytvrzující fáze Ni ₃ Nb
λ_s	[°]	úhel sklonu ostří, měřený v Nástrojové rovině ostří
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří, měřený v Nástrojové základní rovině
σ	[-]	strukturní složka, intermetalická fáze

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Skříň Difuzoru (operace 3)
Příloha 2	Soustružnické nože
Příloha 3	VBD a srovnání
Příloha 4	Operace (2,3,10,11,12,13,14)