

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie
obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Trvanlivost nástroje při obrábění slitiny Nimonic 80A

Autor: **Bc. Miroslav Staviarský**

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

Akademický rok 2011/2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav STAVIARSKÝ**
Osobní číslo: **S09N0097P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Trvanlivost nástroje při obrábění slitiny Nimonic 80A.**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

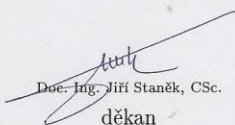
Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Popis současného stavu
3. Návrh a provedení vlastních experimentů
4. Analýza získaných výsledků
5. Technicko - ekonomické hodnocení
6. Závěr


Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 50 - 70 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná
Seznam odborné literatury:

Staněk, Jiří, Němejc, Jiří : Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací /1. vyd.. Plzeň : 2005. ISBN 80-7043-363-9.
Smith, Graham T., : Cutting tool technology : industrial handbook /London : c2008. ISBN 978-1-84800-204-3.
Spitler, David Nee, John G. Smith, David A. Lantrip, Jeff Spitler, David : Fundamentals of tool design /5th ed.. Dearborn : c2003. ISBN 0-87263-650-X.
Forejt, Milan Píška, Miroslav, : Teorie obrábění, tváření a nástroje /Vyd. 1.. Brno : 2006. ISBN 80-214-2374-9.
Mádl, Jan : Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění : doplňkové skriptum /4. vyd. Praha : 1990. ISBN 80-01-00323-X.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce: Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
Katedra technologie obrábění
Datum zadání diplomové práce: 20. října 2011
Termín odevzdání diplomové práce: 25. května 2012


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 12. prosince 2011

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoli nakládání s nimi, možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování za pomoc při řešení diplomové práce

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při řešení experimentální části, za cenné připomínky a podněty poskytnuté během vypracovávání zvoleného tématu. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům haly KTO za přípravu strojního zařízení a celému kolektivu katedry technologie obrábění. Tato diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu FGS-2010-083.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Staviarský	Jméno Miroslav
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“	
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ
NÁZEV PRÁCE	Trvanlivost nástroje při obrábění slitiny Nimonic 80A	

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	66	TEXTOVÁ ČÁST	66	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	<p>Tato diplomová práce měla za úkol zjistit, jaká je trvanlivost nástroje při obrábění slitiny Nimonic 80A. Byly testovány nástroje od 4 různých výrobců. Cílem bylo zjistit, jaká trvanlivost nástroje a jaký nástroj se nejlépe hodí pro obrábění Nimonicu 80A.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	Trvanlivost nástroje, Nimonic 80A

SUMMARY OF DIPLOMA WORK

AUTHOR	Surname Bc. Staviarský	Name Miroslav		
FIELD OF STUDY	2303T004 „Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“			
SUPERVISOR	Surname Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR		
TITLE OF THE WORK	Cutting tool live when machining superalloy Nimonic 80A			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	66	TEXT PART	66	GRAPHICAL PT.	0
----------------	----	------------------	----	----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	<p>This diploma work was to find out what the cutting tool live when machining alloy Nimonic 80A. Were tested tools from 4 producers. The objective was to find out, what cutting tool live and what tool is the best suited from machining Nimonic 80A.</p>
KEY WORDS	Cutting tool live, Nimonic 80A

Obsah

Obsah.....	7
Seznam použitých symbolů a zkratek	9
1. Úvod.....	10
2. Popis současného stavu.....	11
2.1 Nimonic 80A.....	11
2.2 Obrobitelnost Nimonicu 80A.....	13
2.3 Superslitiny	17
2.3.1 Zpevňování za studena	18
2.3.2 Vytvrzující fáze γ'	18
2.4 Obrábění niklových slitin.....	19
2.4.1 Vlastnosti nástroje pro obrábění niklových slitin.....	20
3. Trvanlivost	21
Vliv řezné rychlosti	22
3.1 Opotřeбенé nástroje	23
3.1.1 Příčiny otupování břitu	24
3.1.2 Tvary otupení břitu	26
Velikost otupení břitu se hodnotí:	30
3.2 Dlouhodobá zkouška trvanlivosti	32
3.3 Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti	34
3.4 Drsnost	35
4. Experimentální měření	37
4.1 Obráběcí centrum.....	37
4.2 Dynamometr	39
4.3 Mikroskop.....	40
4.4 Řezné podmínky	41
4.5 Polotovar.....	43
4.6 Použité nástroje.....	44
4.7 Chladicí médium.....	47
4.8 Měření drsnosti	48
5. Analýza dosažených výsledků	49
5.1 Vyhodnocení grafů	50
5.2 Otřepy	56
5.3 Vyhodnocení drsnosti	57
5.4 Vyhodnocení trvanlivosti fréz	59
5.5 Úběr materiálu za jednotku času.....	61

5.6	Vyhodnocení nástrojů.....	62
6.	Ekonomické hodnocení.....	63
7.	Závěr	65
8.	Seznam použité literatury.....	67
	Seznam příloh.....	69
	Seznam obrázků	70
	Seznam grafů.....	72
	Seznam tabulek	73

Seznam použitých symbolů a zkratek

v_c	řezná rychlost	[m/min]
f	posuv	[mm/ot]
f_z	posuv na zub	[mm/zub]
a_p	axiální hloubka řezu	[mm]
a_e	radiální šířka řezu	[mm]
T	trvanlivost břitu	[min]
t	čas	[min]
SK	slinutý karbid	
RO	rychlořezná ocel	
VB	šířka opotřebení hřbetu	[μ m]
VB _{max}	max. šířka opotřebení hřbetu	[μ m]
VB _{lim}	limitní opotřebení	[μ m]
VB _N	šířka opotřebení hřbetu (vrub)	[μ m]
KT	výmol	[μ m]
α	úhel hřbetu	[°]
β	úhel břitu	[°]
γ	úhel čela	[°]
např.	například	
obr.	obrázek	
tab.	tabulka	
č.	číslo	
mat.	materiál	

1. Úvod

V dnešní době se setkáváme stále častěji s materiálem Nimonic 80A. Tato těžko obrobitelná chrom - niklová superslitina se využívá v leteckém, automobilovém a energetickém průmyslu. V těchto technických odvětvích se kladou velké nároky na materiálové vlastnosti, jako je hmotnost, pevnost, odolnost při vysokých teplotách a korozivzdornost. Nevýhodou tohoto materiálu je jeho nízká tepelná vodivost a jeho zpevňování za studena. To je důvod, proč se věnovat obrábění tohoto materiálu a zproduktivnit obrábění této slitiny.

Cílem této práce je zjistit trvanlivost nástroje při obrábění Nimonicu 80A za konstantních řezných podmínek. Obráběným materiálem byl Nimonic 80A v protvářeného a neprotvářeného materiálu. Dalšími hodnocenými veličinami bylo množství odebraného materiálu za jednotku času. Poslední měřenou hodnotou je drsnost materiálu po obrobení.

Teoretická část je věnována rozboru materiálu a obrobitelnosti materiálu.

Praktická část popisuje průběh experimentu při měření. Na závěr bylo provedeno vyhodnocení změřených výsledků a byl vyhodnocen nejvhodnější nástroj pro obrábění této slitiny.

2. Popis současného stavu

2.1 Nimonic 80A

Poprvé se tato chrom - niklová superslitina Nimonic 80A objevila začátkem 2. světové války ve Velké Británii. Hlavní využití je na součásti fungující za vysokých teplot, tím se myslí teploty nad 650°C. Je to teplota, od které se používají žáropevné oceli. Vyrábí se pomocí vysokofrekvenčního tavení, odlévání do forem a vytvrzování na vzduchu.

Hlavními prvky superslitiny Nimonic 80A jsou chrom a nikl s dalšími legujícími prvky jako jsou Fe, Mn, Cu atd. Obecným rysem všech těchto materiálů je „austenitická“ plošně centrovaná kubická krystalová struktura (fcc – face centred cubic) fáze tvořící matici. [1]

Nimonic 80A							
Prvek	Ni	Cr	Al	Ti	Fe	Mn	Si
Min. obsah [%]	Zbytek	18	1,0	1,8	Max.	Max	Max.
Max. obsah [%]	Zbytek	21	1,8	2,7	3,0	. 1,0	1,0

Nimonic 80A			
Prvek	Cu	Co	C
Max. obsah [%]	Max. 0,2	Max. 0,2	Max. 0,1
Min. obsah [%]			

Tab. č. 1: Norma chemického složení superslitiny [2]

Tab. č. 1 ukazuje procentuální hranice, ve kterých se pohybují výrobci Nimonicu 80A. Složením slitiny mohou výrobci ovlivnit vlastnosti a cenu výsledné slitiny.

Vlastnosti		
Hustota	8,18 g/cm ³	0,296 lb/in ³
Bod tání	1365°C	2490°F
Koeficient roztažnosti	12,7 μm/m°C	7,1x10 ⁻⁵ in/in °F
	(20 – 100 °C)	(70 – 212 °F)
Elektrický odpor	1,24 mW*m	
Tepelná vodivost	11,20 W/m°C	

Tab. č. 2: Vlastnosti superslitiny [5]

Mez pevnosti	
595°C	650MPa
650°C	500MPa
705°C	350MPa
760°C	220MPa
815°C	110MPa

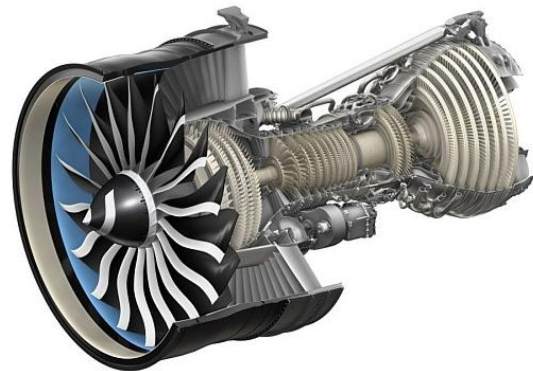
Tab. č. 3: Mez pevnosti [2]

Nimonic 80A má díky svému chemickému složení dobrou pevnost i za vysokých teplot, odolnost proti korozi, oxidaci, vysokou pevnost v tahu a toky při teplotách do 815°C. Využívá se na vysoce namáhané součásti v automobilovém, leteckém a energetickém průmyslu

Použití slitin

Turbinové komponenty

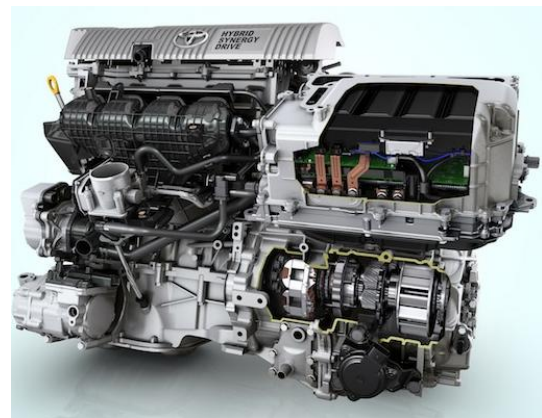
Použijí se od plynové turbíny až k výfukovým systémům jako jsou (lopatky, kroužky, disky, šrouby).



Obr. č. 1: Turbína [6]

Automobilový průmysl

Požadavky na snížení znečišťování životního prostředí → možnosti pro aplikaci niklových superslitin. Výfukové systémy, ventily, senzory, zapalovací jednotky, elektronické spínací jednotky a bezpečnostní systémy.



Obr. č. 2: Motor automobilu [7]

Energetický průmysl

Důvodem použití je korozní odolnost a pevnost při vysokých teplotách. Součásti plynových turbín, přehříváky páry.

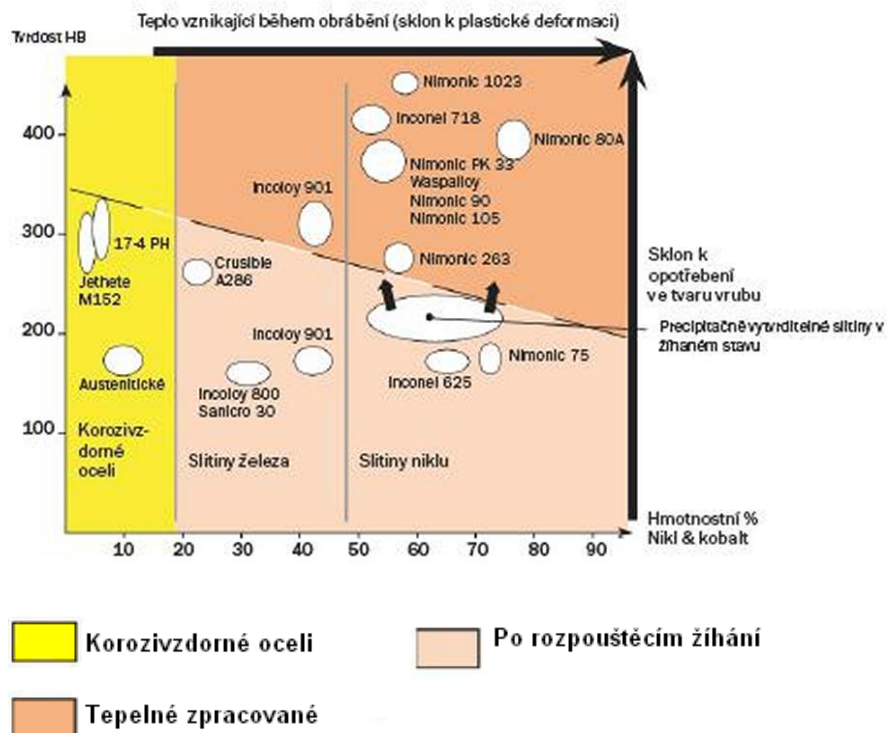


Obr. č. 3: Trubky [8]

2.2 Obrobitelnost Nimonicu 80A

Tuto chrom - niklovou superslitinu s přísadou řady legujících prvků lze obrábět klasickými způsoby, jako jsou např. klasické konstrukční nástrojové oceli. Nevýhoda u těchto materiálů je, že při jejich obrábění dochází k vytvrzování povrchové vrstvy obrobku. Máme-li zabránit povrchovému vytvrzování horní vrstvy, je nutno volit posuv a hloubku řezu nástroje tak, abychom obráběli pod zpevněnou vrstvou. Dále se používají nástroje, které mají kladnou geometrii nastavení. Při obrábění Nimonicu 80A vzniká v místě řezu velké množství tepla vlivem chemického složení materiálu. Proto je při obrábění zapotřebí použít chladicí kapalinu. Pro vyšší řezné rychlosti se používá chladicí kapalina na vodní bázi. Chladicí kapalina s větší viskozitou se používá pro vrtací operace. Pro dosažení menší zpevněné vrstvy se pro obrábění používají čelní válcové frézy.

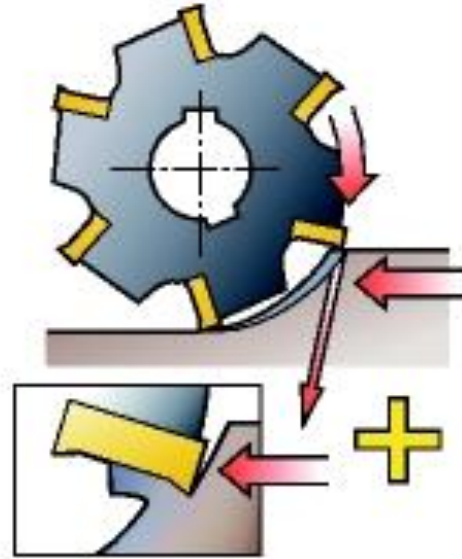
Při obrábění vzniká dlouhá tříška, to je z hlediska tvorby nárůstku a špatného odvodu tepla nevhodné. Proto je nutno použít pro lámání třísky utvařeče a lamače třísky. Tím se předejde negativním vlivům, které vznikají při obrábění. [15]



Obr. č. 4: Obrobitelnost Nimonicu 80A [16]

Směr obrábění

Pro obrábění Nimonicu 80A je zapotřebí mít dostatečně tuhou soustavu S-N-O. Smysl obrábění se volí v sousledném směru, jelikož se zmenší tření na hřbetu nástroje. Při sousledném frézování se obrobek posouvá ve směru otáčení frézy. Zuby začínají odřezávat třísku v místě s největší tloušťkou a vycházejí ze záběru v místě s nulovou tloušťkou třísky. Frézování je nárazové. Obrobek je řeznou silou přitlačován k řezné ploše upínače. To je zvláště výhodné při frézování [11]



Obr. č. 5: Sousledné frézování [3]

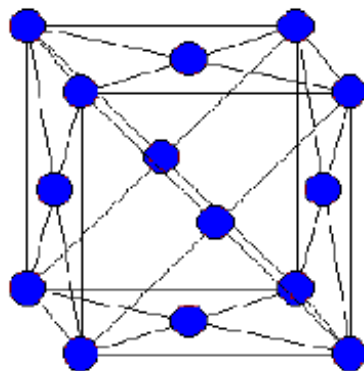
Nikl

Chemická značka Ni (Niccolum)

Mřížka Kubická plošně centrovaná (při zvláštních okolnostech krystalizuje v hexagonální soustavě do 300°C nemagnetická a poté feromagnetická kubická, Curieho bod 357°C). Kompaktní nikl za normálních podmínek dobře odolává vzduchu i vodě. Ve zředěných kyselinách se nikl velmi pomalu rozpouští za vzniku vodíku. Koncentrovanou kyselinou dusičnou je nikl pasivován a nerozpouští se v ní.

Hustota	8,908 g/cm ³
Tvrдость	4
Teplota tání	1455°C

Tab. č. 4: Vlastnosti niklu [5]



Obr. č. 6: Mřížka Kubická plošně centrovaná [5]

Nikl je kovový feromagnetický prvek bílé barvy. Ve sloučeninách se vyskytuje především v mocenství Ni^{+2} , i Ni^{+1} , ale látky s Ni^{+3} jsou nestálé a působí silně oxidačně. Vůči působení vzduchu i vody je nikl poměrně stálý, proto se používá často k povrchové ochraně jiných kovů, především železa. Je také značně stálý vůči působení alkálií a používá se k výrobě zařízení pro práci s alkalickými hydroxidy neboli louhy. V přírodě je hojně zastoupen. [5]

Mechanické vlastnosti	
Litý nikl	$R_m=350 - 420 \text{ MPa}$
Tvářený nikl	$R_m=190 - 240 \text{ MPa}$

Tab. č. 5: Mechanické vlastnosti niklu [5]

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

Tvářený nikl: Při teplotě $600 \text{ }^\circ\text{C}$ nastává rekrytalizace za studena.

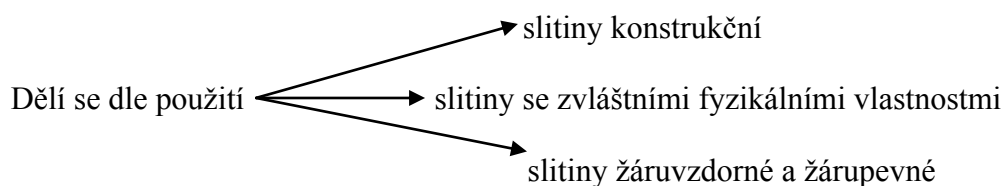
Do $400 \text{ }^\circ\text{C}$ se pevnostní vlastnosti nemění.

Nad $400 \text{ }^\circ\text{C}$ pevnost niklu výrazně klesá.

Mez kluzu klesá pomaleji než pevnost (nutnost vysokých tlaků při tváření). [5]

Slitiny niklu

Tyto slitiny bývají obecně pevnější, tvrdší a houževnatější než většina neželezných kovů. Rychle se zpevňují při tváření → častější mezioperační ohřevy. Dobře reaguje s kovy skupiny T. [5]



Chrom

Vlastnosti chromu	
Teplota tání	1907 °C, (2180 K)
Teplota varu	2671 °C, (2944 K)
Hustota	7,15 g/cm ³

Tab. č. 6: Vlastnosti chromu [5]

Chemická značka Cr, (Chromium)

Chrom je světle bílý, lesklý, velmi tvrdý a zároveň křehký kov. Používá se v metalurgii při výrobě legovaných ocelí a dalších slitin. Tenká vrstva chromu chrání povrch kovových předmětů před korozí a zvyšuje jejich tvrdost. Je nejtvrdějším elementárním kovem a vyznačuje se mimořádně nízkou reaktivitou a vysokou chemickou odolností. Byl objeven roku 1797 Louisem Nicolasem Vauquelinem. Ve sloučeninách se vyskytuje především v mocenství Cr^{+3} a Cr^{+6} , sloučeniny Cr^{+2} jsou silnými redukčními činidly a za normálních podmínek jsou oxidovány vzdušným kyslíkem na trojmocné. Některé jeho sloučeniny mají oxidační číslo Cr^{+4} .

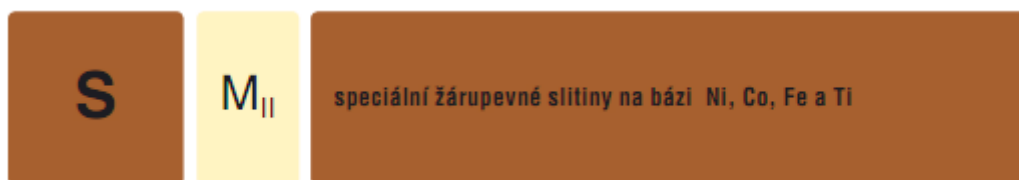
Přes svoji značnou chemickou stálost se chrom pomalu rozpouští v neoxidujících kyselinách (kyselina chlorovodíková), zatímco kyseliny s oxidačním působením povrch kovu pasivují. Chrom se oxiduje při zahřívání v kyslíkovém plameni nebo s oxidačními činidly, jako jsou dusičnany nebo chlorečnany. Přímou se také slučuje s halogeny, sírou, dusíkem, uhlíkem, křemíkem, borem a některými kovy, avšak teprve za žáru. Zaručuje dobrou odolnost slitiny proti oxidaci za vysokých teplot. [5]

2.3 Superslitiny

ČSN	EN	AFNOR	GOST
NIMONIC 80A	USIN 0780	NC 20 TA	EI – 437 B

Tab. č. 7: Různé označení Nimonicu 80A [9]

Nimonic 80A patří díky svému složení do skupiny superslitin. A to do skupiny S jako speciální žárupevná slitina na bázi Ni, Co, Fe a Ti.[2]



Obr. č. 7: Zařazení Nimonicu do slitin [9]

Superslitiny získávají své chemické vlastnosti svým složením legujících prvků. Procentuálním obsahem těchto legujících prvků se dosáhne určité pevnosti, korozivzdornosti materiálu a dalších požadovaných vlastností. Pro získání požadovaných vlastností materiálu závisí také především na tepelném zpracování dané slitiny. Tepelné zpracování se liší, pokud jde o tvářený nebo odlévaný výrobek.

Zpevňující fáze γ' je tvořena proměnou kombinací Ti a Al. Běžně se leguje také pomocí B, Zr a C pro zpevnění hranic zrna [3]. Zvýšením objemového podílu γ' je možné vhodným tepelným zpracováním. [5]

Tváření slitin

Tvářené slitiny jsou přetvářeny z předem odlitých kusů. Aby bylo dosaženo jejich maximálních vlastností, při tváření jsou tyto odlitky několikrát deformovány a následně ohřáty. Tím, že se daná součást několikrát mechanicky opracuje, získá lepší homogenní strukturu, oproti předchozímu litému stavu. Ten v sobě většinou ukrývá značnou segregaci při tuhnutí součásti. [5]

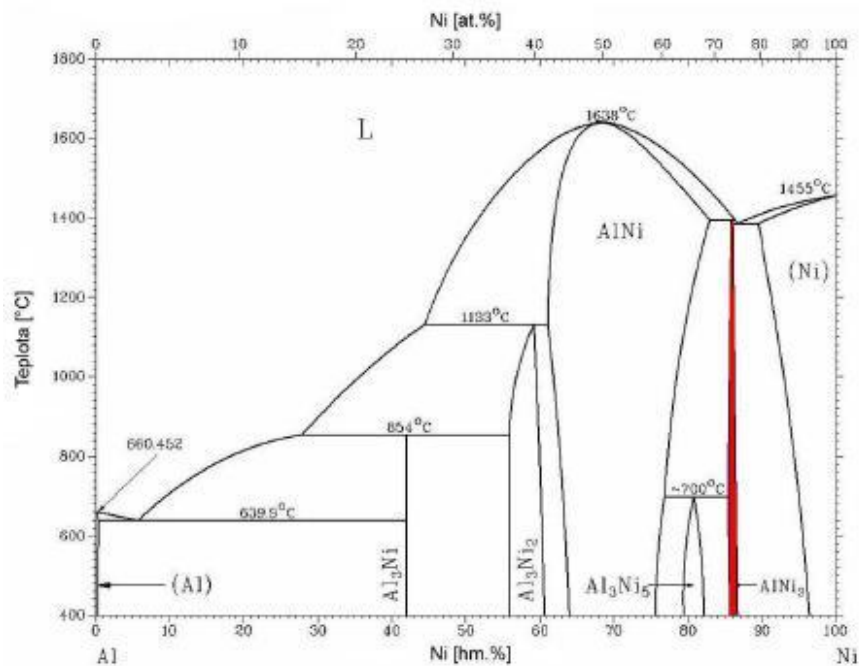
2.3.1 Zpevňování za studena

Niklové slitiny se vyznačují nízkou tepelnou vodivostí a jsou náchylné ke zpevňování za tepla. Při obrábění je důležité zamezit kolísání nástroje, v místě řezu vznikají vysoké tlaky a může dojít k přeměně austenitu na martenzit. To může zapříčinit nalepování obráběného materiálu na řezný nástroj a následně vznikne vylomení řezné části nástroje. Zpevnění za studena lze omezit, jestliže se materiál zpevní už při nízkoteplotním zpevnění. Na obrábění se používají materiály, které sou tažené za studena s odstraněným pnutím. Používají se pro součásti, u kterých vyžadujeme vysokou jakost obráběného povrchu. Jsou-li materiály válcované za tepla, je potřeba před obráběním žíhat. K deformačnímu zpevnění dochází při rovnání, hrubování, atd. To vede až ke dvojnásobnému zvýšení tvrdosti na povrchu součásti než je uprostřed. Proto je nutno volit hloubku řezu i posuv tak, aby nástroj odebíral materiál pod zpevněnou vrstvou.

Dalším způsobem jak se vyvarovat zpevnění za studena je použít nástroj s kladným úhlem nastavení. To umožní plynulý vznik třísky a malé kolísání řezných sil.

2.3.2 Vytvrzující fáze γ'

Tato fáze je vyznačena červeně na obr. č. 8. Je to intermetalická fáze, která má chemické složení Ni_3Al , je možno nahradit Al za (Ti). Ni_3Al je hlavní strukturní složkou, jelikož umožní výborné vlastnosti i za vysokých teplot. To vznikne, když se neuspořádaný tuhý roztok γ ochladí. Na základě toho se stává tuhý roztok γ uspořádaným. Fáze γ zaujímá v mřížce uzlové body Al a Ti, ale naopak Ni se usazuje do středů stěn a tím vznikne struktura označená jako typ L12. viz Obr. č. 8. [5]

Obr. č. 8: Vytvrzování fáze γ' [5]

2.4 Obrábění niklových slitin

Při obrábění niklových slitin je nástroj nejvíce opotřeben na hřbetě břitové destičky. Na čele destičky vzniká opotřebení ve tvaru žlábků. Při obrábění těchto slitin musíme dbát nejen na řeznou rychlost a posuv tak i na hloubku řezu nástroje, jelikož všechny tyto tři parametry mají vliv na řeznou destičku. Čím je větší řezná rychlost, tím se zmenšuje kvalita obrobene plochy, ale opotřebení špičky břitu a velikost posuvu nemají vliv na výslednou drsnost obrobeneho materiálu. Na velikost tvaru opotřebení na čele destičky má vliv obsah nitridů křemíku v obráběném materiálu. Při obrábění nižšími rychlostmi je opět nástroj opotřeben na čele destičky ve tvaru žlábků, ale špička břitu se opotřebí méně. Naopak při vyšších řezných rychlostech je opotřebení na čele destičky menší.

Chladicí kapalina

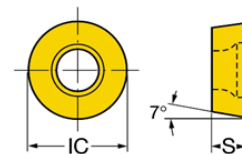
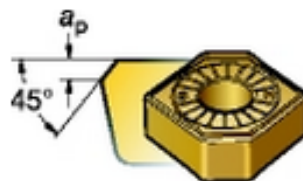
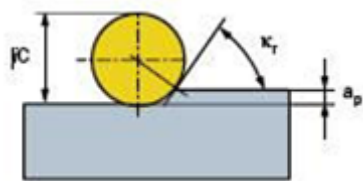
Abychom dosáhli lepšího obrábění, používají se různé druhy chladicích kapalin např. maziv nebo se chladí za pomoci vzduchu. Nejčastěji se pro chlazení pomocí kapaliny používají minerální oleje. Při obrábění vysokými rychlostmi je použita chladicí kapalina na bázi vody. Chladicí kapaliny chladí lépe než minerální oleje. Při obrábění nižšími řeznými rychlostmi se používají maziva s vyšší hustotou.

Řezné prostředí ovlivňuje procesy na povrchu břitu – abrazi a součinitele tření (zmenšení tření \Rightarrow vznik tepla). Proto bylo nutné při obrábění použít chlazení. Použitím umělého řezného prostředí se nám zvýší trvanlivost. Teplota řezání a vznik tepla (\Rightarrow odvod tepla).

Účinky řezného prostředí: - **chladicí** (snížení teploty řezání zvětšeným odvodem tepla)
- **mazací** (snížení koeficientu tření \Rightarrow i vzniklého tepla)
- **čisticí** (odplavování třísek a dalších částic) [4]

2.4.1 Vlastnosti nástroje pro obrábění niklových slitin

Pro obrábění niklových slitin je vhodné používat nástroje, které mají kladný úhel nastavení. To umožní odřezávání materiálu z obrobku a nikoliv odtlačování materiálu. Dále je nutné, aby byl zajištěn plynulý odchod třísek z místa řezu. Kdyby byl úhel nastavení malý, mohlo by vzniknout tření třísky materiálu s obrobkem. To by mělo za následek zpevnění povrchové vrstvy materiálu. V případě příliš velkého úhlu, by došlo ke vzniku velkých řezných sil, které působí na nástroj a ten by se předčasně opotřebil. Na hloubku řezu a na rozdělení sil, které ovlivňují nástroj, má vliv úhel nastavení vedlejšího ostří. Při obrábění vzniká velké teplo v místě řezu, to ovlivní rádius špičky nástroje tak, že rozptýlí vzniklé teplo v místě řezu. [15]



Obr. č. 9: Destička S05F [16]

Obr. č. 10: Destička GC1105 [16]

Obr. č. 11: Destička H13A [16]

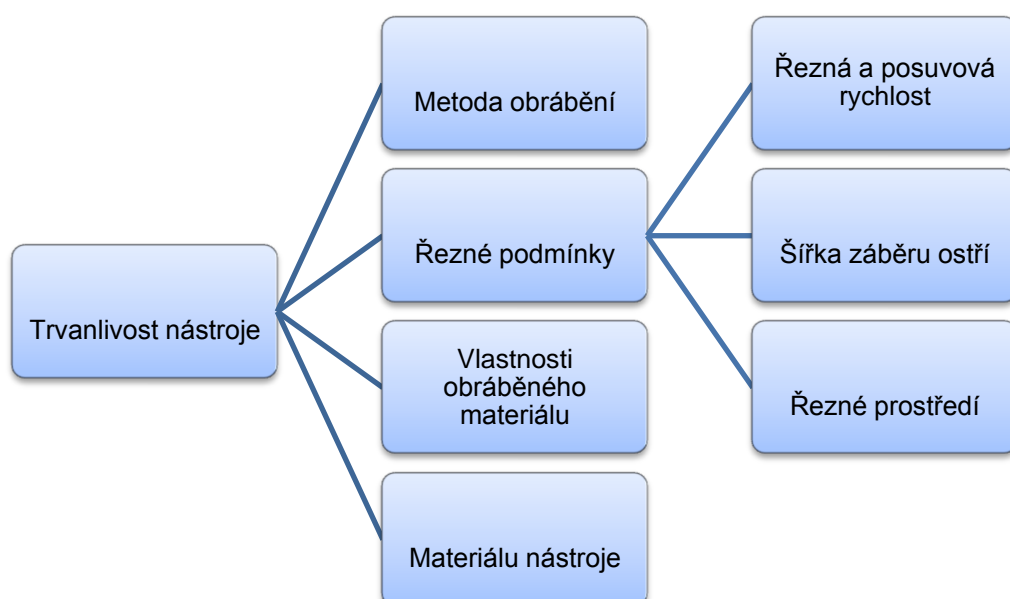
3. Trvanlivost

Pojem trvanlivost řezného nástroje lze definovat jako součet všech čistých (strojních) časů řezání, od začátku obrábění, až po opotřebení břitu nástroje nebo vylomení břitu na předem stanovené limitní opotřebení břitu. Kritérium opotřebení a jeho hodnota musí být stanoveny tak, aby vyráběný obrobek měl požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu po celou dobu trvanlivosti nástroje. Trvanlivost břitu je snadno rozpoznatelným jevem, kdy se nejčastěji projevuje na jakosti obrobene plochy, přesnosti rozměrů obrobku. Nezaručuje kontrolovatelný odchod třísky, není zaručena spolehlivá funkce břitu popřípadě je doprovázeno zvukovým vjemem.

Dalším faktorem jak lze posuzovat trvanlivost je:

- počtem provedených operací (obrobených kusů)
- celkovou délkou dráhy břitu (např. v metrech)

Nejkrajnější případ, který může nastat, je lom. Ten je zcela nemyslitelným jevem, protože velká část výroby probíhá pod zavřeným krytem stroje a je automatizována, často i bez obsluhy. Z tohoto důvodu je nutno zásadně dodržovat stanovení trvanlivosti a spolehlivosti břitu a tím předcházet drastickým koncům. [4]



Obr. č. 12 Vlastnosti co ovlivňují trvanlivost

Vliv řezné rychlosti

S řeznou rychlostí souvisí samozřejmě teplota řezání. Ta má jeden z nejvýznamnějších vlivů na trvanlivost, ale projevuje se ještě řada jiných vlivů (vlastnosti materiálu břitu, vznik nárůstku). Obecně platí, že se stoupající řeznou rychlostí klesá trvanlivost břitu, ale nerovnoměrně. [12]

Závislost trvanlivosti břitu na řezné rychlosti v $T=f(v)$. To se popisuje tzv. Taylorovým vztahem.

$$v \cdot T^n = c_{vT}$$

c_{vT} = Taylorova konstanta (hodnota řezné rychlosti pro trvanlivost břitu 1 minuta)

n = je dán rozsahem trvanlivosti břitu

Po úpravě vypadá Taylorův vzorec

Konstanta c_{vT} je dána druhem materiálu břitu.

Exponent

$$T = \frac{c_{Tv}}{v^m} [\text{min}, m / \text{min}]$$

$m = \frac{1}{n}$ závisí na aktuálním rozsahu řezné rychlosti a druhu řezného materiálu.

Exponent m je směrnici přímky k ose v_c a konstanta c_{vT} je teoretickou trvanlivostí břitu při řezné rychlosti 1m/min. Při růstu aktuálního rozsahu v_c se m zvětšuje u každého druhu řezného materiálu.

Hodnoty m pro některé řezné materiály:

RO $m = 4,5$ až **8**

SK $m = 2,5$ až **5**

ŘK $m = 2$ až **3**

Čím je m větší, tím je přímka strmější a tím změna řezné rychlosti vyvolá větší změnu trvanlivosti.

3.1 Opotřebené nástroje

Otupení břitu

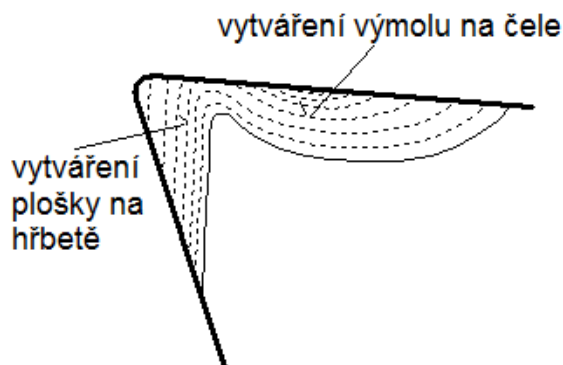
Opotřebenění patří mezi běžný následek odebrání materiálu. To je zapříčiněno silovým stykem dvou na sebe působících ploch. Tyto plochy na sebe působí relativním pohybem. Otupení se měří pomocí experimentálních metod (příčiny a jejich velikosti v závislosti na čase řezání) související se stanovením optimálního otupení břitu na trvanlivosti břitu T . Optimální velikost otupení břitu se určí z kvalitativních (přesnost a drsnost povrchu) a ekonomických (trvanlivost, životnost) hledisek. Všechny tyto mechanismy působí v průběhu času plynule, s tím že časový okamžik jejich působení nemusí být pokaždé stejný.

Opakem jsou plastická deformace a křehký lom, ty oproti předchozím mechanismům působí náhle a v daném okamžiku. Většinou to má za následek zničení nástroje (změna tvaru břitu nástroje, lavinové opotřebenění a ulomení špičky). V důsledku abraze, adheze, difúze a oxidace se opotřebovává čelo nástroje, hřbet se opotřebovává vlivem oxidace a abraze. Geometrie nástroje, druh operace a řezné podmínky mají vliv na to, zda se opotřebí nástroj na hřbetě nebo na čele popřípadě na špičce. [12]

Silové a tepelné interakce mezi materiálem obrobku (třísky) a materiálem břitu způsobí změnu:

- a) povrchových vrstev břitu (změna tvrdosti, drsnosti povrchu)
- b) tvaru břitu (změna řezných úhlů α , γ a tvaru čela i hřbetu) \Rightarrow břit se otupuje.

Experimentální studium otupení břitu se zajímá o: Fyzikálně chemickou podstatu otupení



Obr. č. 13: Ukázka jak se opotřebovává břit [12]

Vznik otupení

1. Otěrem: v místech, kde nastává dotyk břítu nástroje s materiálem obrobku. Nastává při každém obrábění řezáním.
2. Plastickou deformací břítu: při extrémním tepelném a silovém zatížení břítu.
3. Křehkým lomem břítu: při silovém zatížení břítu v důsledku dynamických sil při přerušovaném řezu, chvění, atd. [12]

3.1.1 Příčiny otupování břítu

Fyzikální (při nižších teplotách)

Na stykových plochách břítu s obrobkem dochází ke složitým fyzikálním a chemickým jevům, jejichž důsledkem mění břit svoje vlastnosti a tvar, otupuje se.

Pro dosažení ekonomických, kvantitativních a kvalitativních výsledků obrábění je zapotřebí nalézt odpovídající optimální pracovní podmínky a materiál břítu nástroje. Jejich nalezení se opírá o výsledky experimentálního studia fyzikálně-chemické podstaty otupení.[3]

Znalost vlivu dějů na otupení umožňuje aktivně ovlivňovat intenzitu otupování:

- u **obrobku** - při výrobě např. ocelí volbou vhodného způsobu dezoxidace
- u **břítu** - volbou vhodného chemického složení nástrojových materiálů
- použitím vhodného **řezného prostředí** apod.

- **abraze**: brusný otěr. Vyskytuje se u všech řezných nástrojů. Příčinou jsou tvrdé mikročástice přítomné v materiálu obrobku, které do materiálu břítu vyrývají mikrorýhy. Intenzitu abraze podporují fázové strukturní změny v povrchových vrstvách břítu vyvolané vysokou teplotou a vysokým napětím. [16]

- **adheze**: vznik a okamžité následné porušování mikro svarových spojů, na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiál a kovově čistých styčných povrchů. [16]

Chemické (při vyšších teplotách)

- difúze: Vyskytuje se, když teplota v místě dotyku mezi břitem a obrobkem překročí tzv. disociační teplotu prvků obsažených v materiálu břitu resp. obrobku, tj. teplotu vyšší než 680°C. Atomy se z obráběného materiálu dostanou do nástrojového materiálu a naopak.[16]

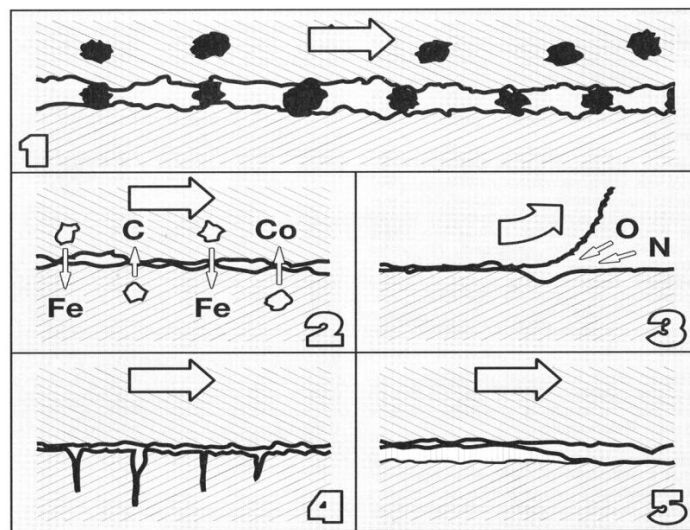
Druhy: heterogenní

reaktivní

- chemické reakce: Vzniká při vyšších teplotách na 700°C dochází i k chemické reakci některých prvků v břitu s prvky v:

a) řezném prostředí

b) obráběném materiálu



Obr. č. 14: Hlavní mechanismy otupení břitu [16]

- 1 – abrazivní opotřebení
- 2 – difusní opotřebení
- 3 – oxidační opotřebení
- 4 – statický či dynamický lom
- 5 – adhezní opotřebení

křehký lom (vyštipování) břitu: tento lom má za následek vysoké mechanické zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu, atd.

plastickou deformaci břitu: tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase, která se může ve svém nejnejpříznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení.

3.1.2 Tvary otupení břitu

Kvantifikovaná hodnota opotřebení je kritérium, které je uvedeno na obr. č 18. Toto kritérium nám poslouží ke stanovení hodnoty trvanlivosti obráběcího nástroje pro určitý případ obrábění. Velikost opotřebení se volí z technologického hlediska a to když nástroj neodebírá materiál v dostatečné přesnosti a při špatné kvalitě. Dále se volí z ekonomického hlediska, to vyplývá z požadavků hospodárnosti procesu. Mezi nejrozšířenější kritéria patří VB, KT a VB_{max} . [12]

Fyzikální i chemické děje působí v průběhu vzniku otupení současně, i když v různé intenzitě. Za určitých okolností může být některý z dějů rozhodující, např. abraze při nízkých řezných rychlostech nebo naopak difúze při vysokých řezných rychlostech.

Rovněž místo působení (střed kontaktní plochy oproti okrajům kontaktní plochy) ovlivňuje intenzitu toho konkrétního děje. Tvary otupení jsou také závislé na charakteru řezání a řezném materiálu.

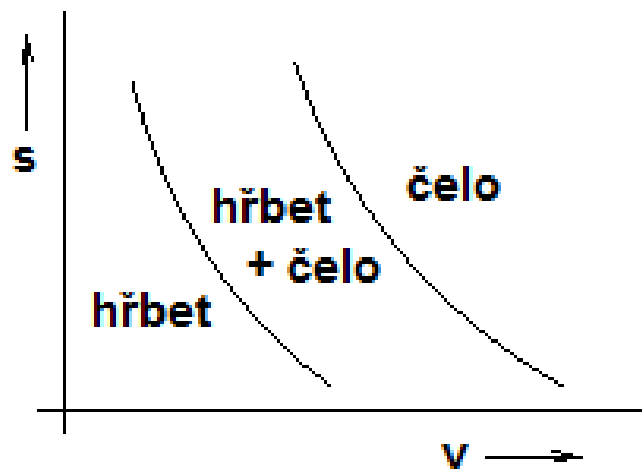
Základními formami otupení jsou:

- otřená ploška na hřbetu břitu (kontakt hřbet- plocha řezu)
- výmol na čele (kráter, žlábek) břitu (kontakt čelo – tříska)
- rýhy na okrajích opotřebení čela a hřbetu

Vlivy na tvar a velikost otupení břitu otěrem:

a) Druh řezného materiálu:

RO – významnější otupení hřbetu, nevýrazné otupení čela z důvodu nízké řezné rychlosti a koncentrace zatížení břitu u ostří.



Obr. č. 15: Vlivy na tvar a velikost otupení břitu otěrem [12]

Geometrie břitu:

α : zvětšení nebo zmenšení z doporučené hodnoty ($5-8^\circ$) \Rightarrow růst opotřebení VB_B

(větší tření, růst teploty)

γ : negativnější hodnoty \Rightarrow růst opotřebení KT

κ : zvětšení \Rightarrow růst otupení VB_B i KT , hlavně však VB_C (větší tepelné zatížení špičky)

r_ϵ : menší hodnoty než doporučené \Rightarrow růst VB_C , zvláště při $r_\epsilon = 0$

b) Řezné podmínky:

Poměrný vliv v_c a s - viz diagram výše.

c) Materiál obrobku:

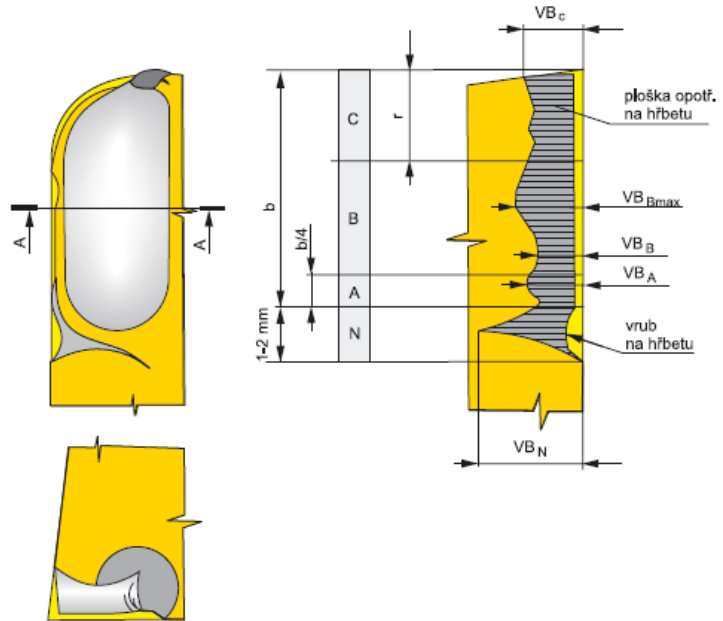
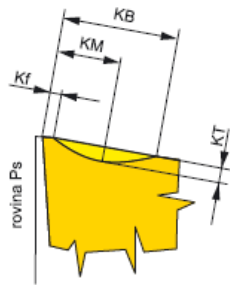
Povrchová kůra nebo zpevněný povrch \Rightarrow růst opotřebení VB_N

Náchylnost ke zpevňování \Rightarrow růst opotřebení VB_C , zvláště na vedlejším ostří

Horší tepelná vodivost \Rightarrow růst opotřebení VB a zaoblování ostří (r_N).

ŘEZ A-A

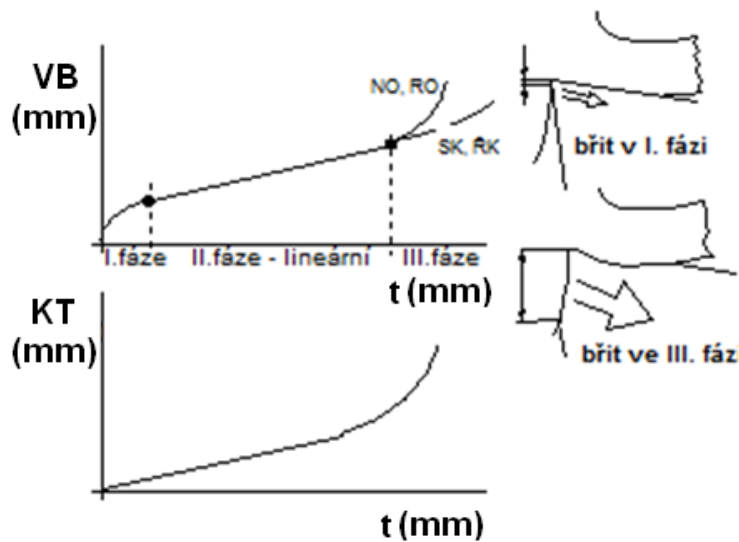
- K_f = vzdálenost okraje výmolu
- K_B = šířka výmolu
- K_M = vzdálenost středu výmolu
- K_T = hloubka výmolu



Obr. č. 16: Druhy opotřebení břitu [16]

Závislost otupění otěrem na době řezání

S rostoucím časem obrábění se otupí břit - rozměry **VB**, **KT** i další - nelineárně zvětšují. Gradient nárůstu otupění s časem řezání = **intenzita otupování**



Obr. č. 16: Závislost otěru na době řezání [12]

I. fáze: Tato fáze vzniká vlivem opotřebení nerovnosti ostří

V této fázi opotřebení intenzivně narůstá, ale intenzita pomalu klesá, až dojde k ustálení na určité hodnotě. Řezný klín je ovlivněn geometrickými a materiálovými defekty. Hřbet nástroje je vystaven velkému tlaku z obráběného materiálu. Ke snížení měrných tlaků dochází s rostoucí šířkou plochy opotřebování na hřbetě. [16]

II. fáze: Lineární fáze

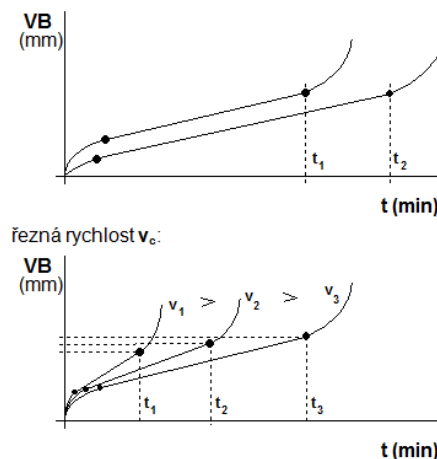
Intenzita opotřebení je menší než v předchozí fázi a ke změně dochází málo. Vyžaduje se, aby opotřebení v této fázi bylo co nejmenší a zároveň byl tento úsek co nejdelší. [16]

III. fáze: Vznik intenzivního opotřebení

V této fázi nastává nárůst intenzity opotřebení. Důvodem je hlavně změna podmínek spolupůsobení obráběného a řezného materiálu. Při opotřebení nástroje dochází ke změně geometrie určité části řezného klínu a tím dochází ke změně směru a velikosti řezných sil. Dále se změní velikost normálových tlaků a třecích sil na čele a na hřbetě nástroje dále roste teplota v řezu. Řezná hrana ztratí svojí tvarovou pevnost, dále dochází k plastické deformaci nebo ke křehkému porušení. [16]

Další vlivy na časový průběh otupení VB

- drsnost ploch bříty a kvalita ostří, poloměr zaoblení ostří r_N :



Obr. č. 17: Další vlivy na časový průběh otupení VB [12]

- řezná rychlost v_c :

Rostoucí v_c obecně zvyšuje intenzitu otupování **VB** i **KT**, ale při obrábění uhlíkových ocelí je průběh **VB** nemonotónní v oblasti tvorby nárůstku (stabilní \Rightarrow zmírňuje intenzitu otupování, nestabilní \Rightarrow naopak).

- vliv posuvu s :

Růst s působí podstatně méně výrazně na růst intenzity otupování **VB** než v_c , ale od určité hodnoty úhlu hřbetu α intenzita v závislosti na s rychle roste (pracovní úhel hřbetu α se rychle zmenšuje).

Velikost otupení břitu se hodnotí:

- a) objemem nebo hmotností opotřebeného materiálu břitu
- b) měřením velikosti rozměrů otupení na čele a hřbetě břitu
- c) pozorováním jevů souvisejících s otupením břitu

ad a)

Přímé metody:

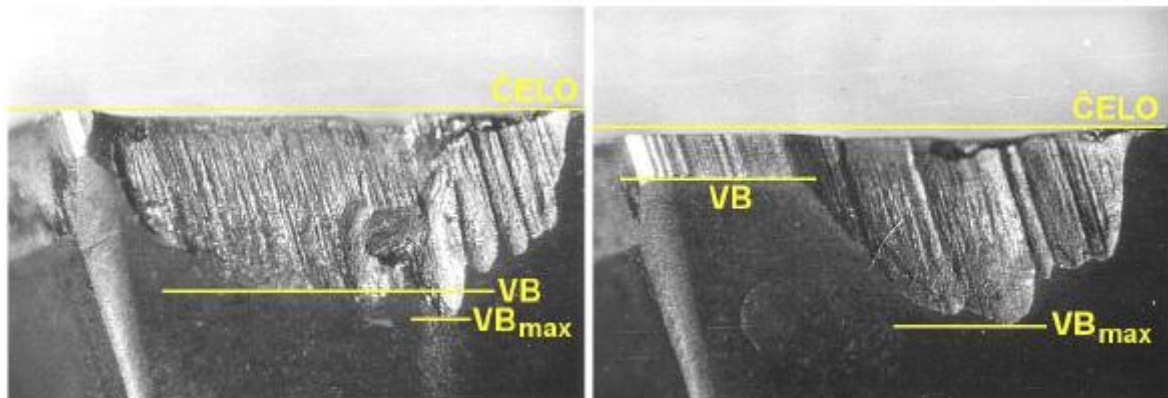
- měření vybraného kritéria opotřebení
- vážení břitové destičky
- elektrické metody (odporové, indukční)
- ultrazvukové, radioaktivní, pneumatické

Nepřímé metody:

- měření a vyhodnocování jednotlivých složek řezné síly
- měření a vyhodnocování příkonu obráběcího stroje
- měření kmitání, teploty řezání
- měření struktury povrchu měřené teploty

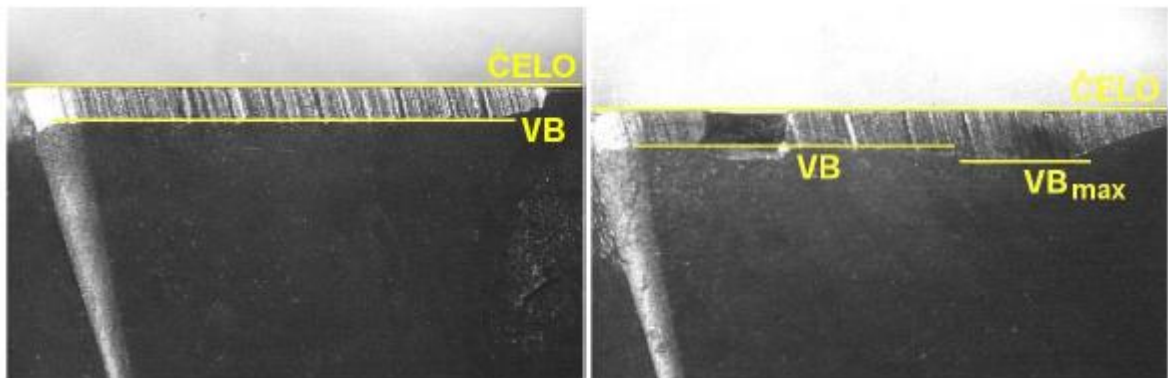
ad b)

Měření rozměrů otupení je nejčastější a nejjednodušší způsob zjišťování otupení břitu. Nejčastější formou otupení břitu rezného nástroje je **otřená ploška na hřbetu**. Není-li rovnoměrná, měří se její průměrná šířka V_B a hodnota V_{Bmax} .



Obr. č. 18: Ukázka velkého otupení na nástroji

Intenzivní otupení ve formě rýh v místě kontaktu břitu s obráběnou plochou, viz. obr. č. 18. To je způsobeno např. pískem z licí formy, okujemi apod. Taková forma je nebezpečná pro náhlý lom břitu a proto se sleduje a měří (V_N).



Obr. č. 19: Ukázka malého otupení na nástroji

U břitů fréz je tvar otupení podobný, často s rovnoměrnější šířkou. Pokud má tvar břitu ostřejší přechody ostří (špičky), např. u tvarových fréz, bývá intenzivnější otupení hřbetu právě v těchto místech. Druhou nejčastější formou otupení břitu je **výmol** (žlábek, kráter), který vytváří odcházející tříska na čele břitu.

Nejčastěji se měří jeho hloubka **KT**, nebo šířka **KB**, vzdálenost jeho okraje od ostří nebo osy žlábků od ostří **KM**. [12]

3.2 Dlouhodobá zkouška trvanlivosti

Touto problematikou se začal zabývat počátkem 20. století F. W. Taylor a zjistil, že z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv právě řezná rychlost a odvodil základní vztah pro vzájemnou závislost těchto dvou veličin, které jsou u nás známy pod názvem "**T-vc** závislost" (někdy též "Taylorův vztah").

Dlouhodobá zkouška probíhá za podmínek blízkým skutečnému obrábění. Následně je určen obráběcí stroj, materiál, upnutí, tvar a rozměry obrobku. Je možné zjednodušit obráběný tvar tím, když můžeme značně snížit časovou a nákladovou náročnost zkoušky. Řezný nástroj může být určen, ale častěji je třeba zvolit – řezný materiál, geometrii břitu.

Volba řezného materiálu závisí na materiálu obrobku a typu operace. Řezné prostředí je vázáno na druh obráběného materiálu, druh obrábění a na řeznou rychlost. [12]

Příprava experimentu:

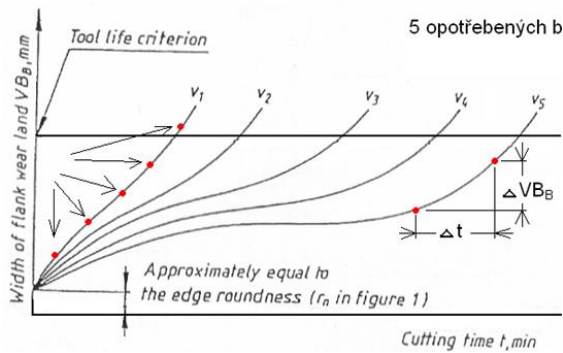
Určíme kritériální opotřebení a jeho velikost. Opotřebení je závislé na druhu nástroje a na druhu obráběného materiálu. Je možné zjistit velikost a typ opotřebení z předešlých experimentů. Velikost kritériálního opotřebení je závislá na typu operace (hrubování, načisto), funkci břitu s velikostí opotřebení a dostupných zdrojích. [12]

Volba řezných podmínek:

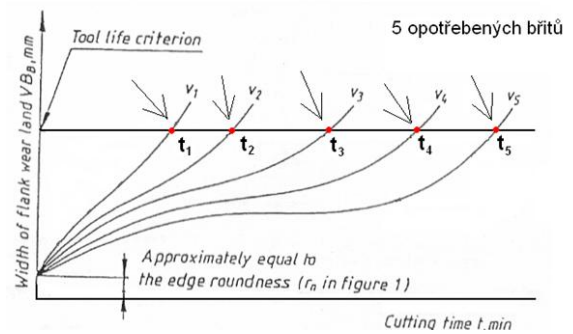
Před vlastní zkouškou je možno udělat předexperiment, při němž je získána představa o velikosti řezné rychlosti, posuvu, hloubek řezu ve vztahu k trvanlivosti. Dále volit doporučené řezné podmínky dodané výrobcem nástroje. Volba velikosti a počtu úrovní řezných podmínek. Velikost je dána doporučením nebo výsledky předexperimentu. Počet úrovní závisí na cíli experimentu a velikosti dostupných zdrojů (finance, čas, lidé).

S lineárním růstem počtu úrovní roste počet měření exponenciálně. Volba počtu opakování měření závisí na přesnosti výsledků, které chceme dostat. Čím více opakování, tím vyšší jistota získané Taylorovy funkce. V tomto okamžiku bychom měli

mít experimentální funkční model (EFM) = určený počet nezávisle proměnných, počet bodů měření, počet úrovní, počet opakování



Obr. č. 20: Průběh experimentu [12]



Obr. č. 21 Vyhodnocení dlouhodobé zkoušky [12]

Stanovení charakteristické křivky opotřebení z minimálně 5-ti bodů tak, aby při posledním času bylo naměřeno opotřebení již nad kritickou velikostí opotřebení. Křivku nelze extrapolovat mimo čas řezání. Zkoušku opakovat 3x při každé řezné rychlosti. [12]

-vynesení bodů do grafu

-ln souřadnic v, T

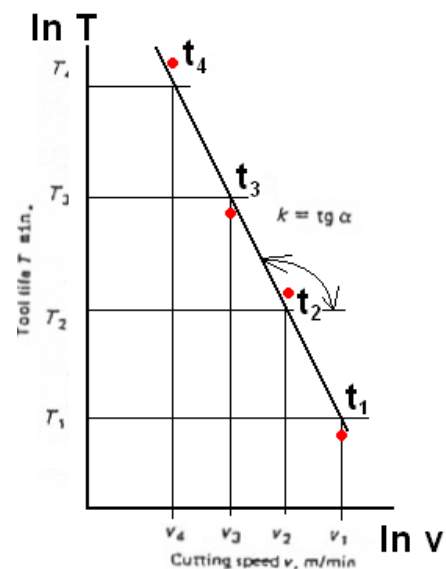
-proložení přímkou

$$\ln T = \ln c_{TV} - m \cdot \ln v$$

$$T = c_{TV} \cdot v^{-m}$$

$$v \cdot T^{1/m} = c_{ISO}$$

$$m = k = \text{tg } \alpha$$



Obr. č. 22: Logaritmická závislost T na v [12]

$\ln c_{TV}$ je hodnota na ose $\ln T$, kde tuto osu protíná přímka

$$c_{TV} = (\ln c_{TV}) \cdot e$$

Výsledkem dlouhodobé zkoušky trvanlivosti je určený Taylorův vztah

$$T = 6 \cdot 10^6 \cdot v^{-3,25}$$

$$T = \frac{6 \cdot 10^6}{v^{3,25} \cdot f^{2,1} \cdot a_p^{1,3}}$$

Do určeného Taylorova vztahu je možno dosadit řeznou rychlost z intervalu měřených řezných rychlostí a získat tak trvanlivost pro určitou řeznou rychlost. Nelze dosadit řeznou rychlost mimo interval měřených řezných rychlostí. Druhým způsobem je dosadit trvanlivost a určit tak řeznou rychlost. [12]

3.3 Krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti

Tyto zkoušky jsou méně objektivní, ale mají výhodu v nesrovnatelně kratší době trvání a nižší spotřebě materiálu. Rychlé a dostatečně přesné stanovení obrobiteľnosti materiálu, zejména třískovým obráběním s definovatelnou řeznou geometrií břitu nástroje, je při současném prudkém vývoji neustále nově vyvíjených vysoce pevných, tvrdých a přitom zvláště houževnatých technických materiálů velmi potřebné a praxí žádané.

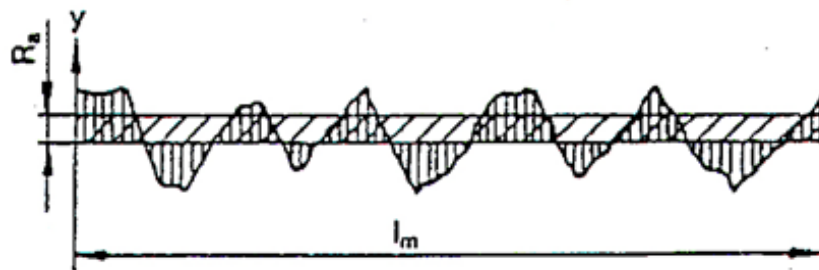
Krátkodobé zkoušky jsou vhodné pro rychlé rozřídění skupiny materiálu podle stupně obrobiteľnosti. Pro ověření eventuální změny stupně obrobiteľnosti u jednotlivých dodávek stejného druhu materiálu. Nebo pro rychlé určení relativního stupně obrobiteľnosti z jednotlivých taveb a u nově vyvíjených materiálů. Podle principu a použitého kritéria lze tyto zkušební metody dále rozdělit na přímé a nepřímé. Metody založené na přímém zjišťování intenzity opotřebení za zostřených či jinak smluvně upravených podmínek. Nepřímé metody vycházejí ze známého, resp. předpokládaného vztahu mezi opotřeběním břitu a charakteristickými parametry řezného procesu. Jsou založeny převážně na zjišťování energetických parametrů. [12]

3.4 Drsnost

Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle (risky, trhlinky, důlky apod.) a které vznikají vadami materiálu, poškozením aj. Podle převládajícího směru nerovností se drsnost posuzuje v příčném nebo podélném směru. Parametry drsnosti se vyhodnocují na skutečných profilech, které se získávají jako průsečnice kolmé popř. šikmé roviny se skutečným povrchem. [14]

R_a - Aritmetická střední hodnota drsnosti [13]

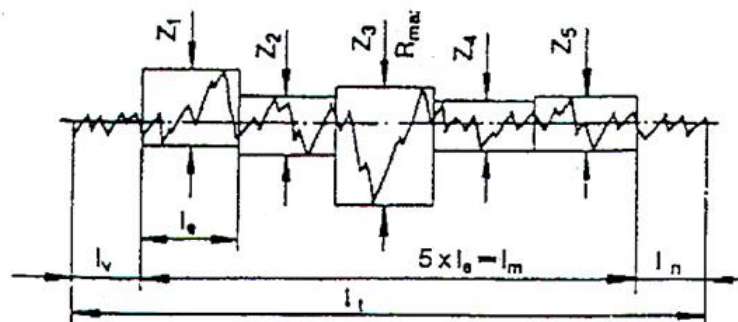
Střední čára profilu (m-čára) je vztažná čára, která má tvar geometrického profilu a rozděluje zjištěný profil tak, že součet čtverců odchylek tohoto profilu od střední čáry je minimální (v grafickém záznamu postačuje, aby součty ploch nad střední čarou a pod ní byly stejné). [14]



Obr. č. 23: Aritmetická střední hodnota drsnosti [13]

R_{max} – maximální drsnost

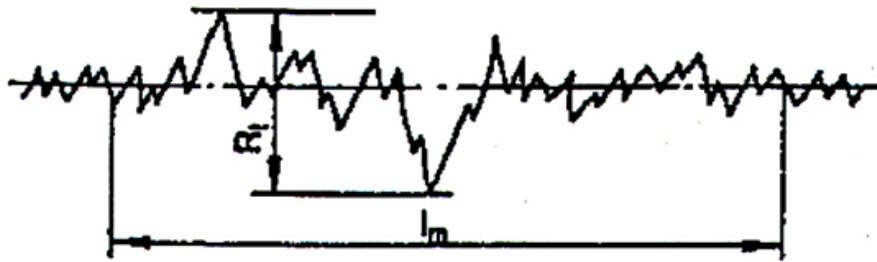
Největší, uvnitř celé dráhy měření l_m .



Obr. č. 24: Maximální drsnost [13]

R_t – maximální drsnost

Svislá vzdálenost od nejvyšší špičky k nejhlubší rýze filtrovaného profilu drsnosti uvnitř vztažné dráhy.



Obr. č. 25: Maximální drsnost [13]

4. Experimentální měření

Pro naměření potřebných hodnot do diplomové práce byla použita laboratoř KTO, kde mi bylo zapůjčeno potřebné vybavení:

- Třiosé frézovací centrum MCV 750 A
- Dynamometr
- Mikroskop
- Pneumatický svěrák
- PC
- Měřené nástroje
- Drsnoměr

4.1 Obráběcí centrum

Pro zjištění trvanlivosti bylo nutno použít frézovací třiosé obráběcí centrum MCV 750A, které se nachází v halové laboratoři KTO. Toto obráběcí centrum svým softwarovým i technickým příslušenstvím vyhovovalo pro naměření hodnot. Obráběcí centrum je vybaveno řídicím systémem HEIDENHAIN TNC 426/430 ME.



Obr. č. 26: Třiosé obráběcí centrum MCV 750A

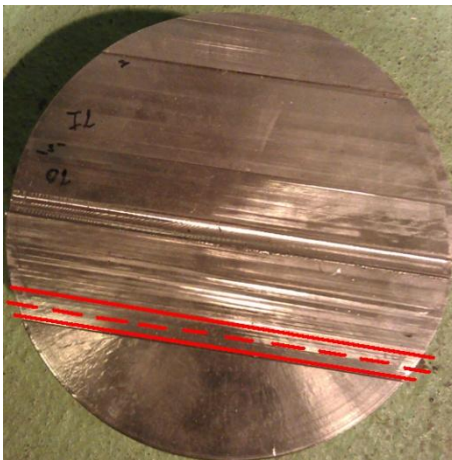
Pomocí tohoto řídicího systému, byl naprogramován jednoduchý program, který usnadnil a urychlil práci při přejezdech materiálu. Materiál byl upnut do pneumatického svěráku. Ten byl připevněn na stůl obráběcího centra pomocí upínek. Pneumatický svěrák umožnil tužší a bezpečnější upnutí materiálu. Při obrábění bylo nutno místo řezu chladit. Bohužel nebylo možné chladit tryskami na vřetenu z důvodu špatného přístupu chladicí kapaliny. Z tohoto důvodu byla přidána tryska, která chladila místa řezu.



Obr. č. 27: Upnutí neprotvářeného materiálu

Obr. č. 28: Upnutí protvářeného materiálu

Obr. č. 29 a obr. č. 30 ukazuje, jak a na jakém místě byl materiál obráběn. Nástroj obráběl v sousledném směru. Při zpětném přejezdu materiálu, nástroj přejížděl rychloposuvem nad materiálem.

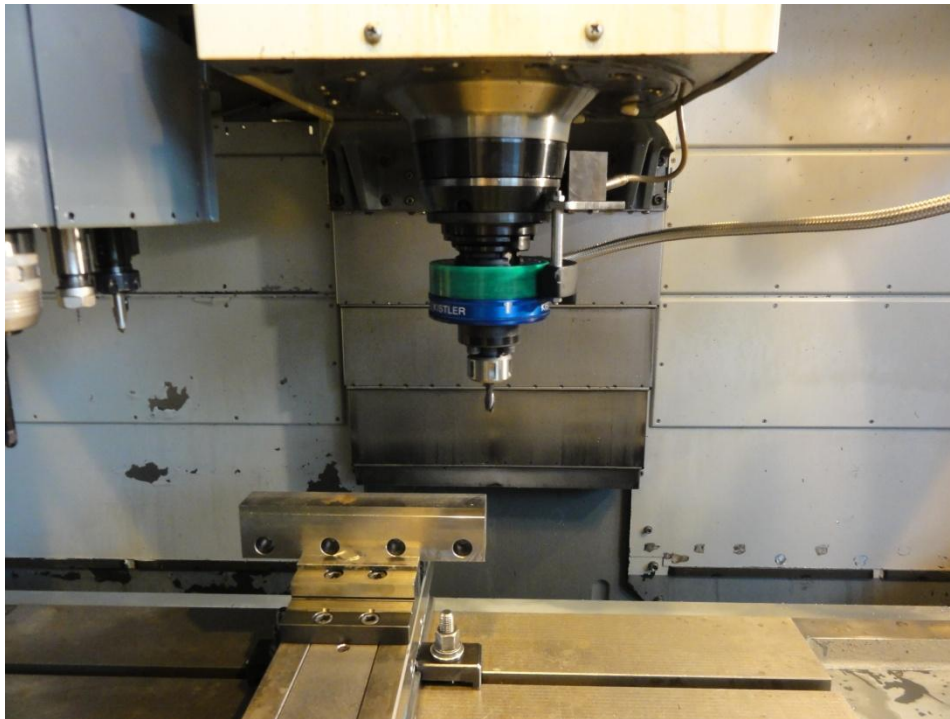


Obr. č. 29: Neprotvářený materiál

Obr. č. 30: Protvářený materiál

4.2 Dynamometr

Pro upnutí nástroje byl použit rotační dynamometr, do kterého se pomocí kleštiny upnul nástroj. Každý upnutý nástroj byl upnut se stejným vyložení. Nástroj se upínal delším břitem do osy F_x a to proto, aby se dodrželo stejných upínacích podmínek při každém měření.



Obr. č. 31: Upnutý dynamometr ve vřetenu

Dynamometr snímá řezné síly v závislosti na čase při obrábění. Pomocí programu Labview byly vygenerované grafy, na kterých je na ose x čas a na ose y krouticí moment. Z grafu je patrná doba záběru frézy. Jelikož tvar neprotvářeného materiálu byl kulatý, tak byl čas obrábění zjištěn z doby záběru břitu, který byl vygenerován programem Labview.

4.3 Mikroskop

Pro zjištění limitního opotřebení nástroje, bylo nutno břit proměřit a to po určité době obrábění nebo po určitém počtu přejezdů. Pro měření otupení břitu byl použit optický mikroskop od firmy Guehring Machinebau GMBH. Používaná optika umožňovala zvětšení 5x - 75x. Nástroj se do sklíčidla mikroskopu upínal společně s dynamometrem. Dynamometr se upnul do kuželové dutiny vertikálně.



Obr. č. 32: Optika pro mikroskop



Obr. č. 33: PC propojený s Mikroskopem

Upnutí umožňovalo otáčení v ose nástroje o 360°. Po upnutí nástroje do dynamometru byl pomocí optické čočky zaostřen měřený břit, který byl označen. V našem případě byl břit upnut do osy F_x na dynamometru. Na mikroskopu je možno pomocí ladících koleček zaostřit břit. Mikroskop umožňuje pomocí kamery přenesení obrazu v reálném čase na monitor PC. K vyhodnocování byl použit software systém WMS. Ve kterém, pomocí funkce line, se břit obtáhne a tím se dostane výchozí maska. Podle tohoto obrysu byl břit dále nastavován do stejné polohy při následném měření.

Pro naměření otupení slouží na mikroskopu funkce rovnoběžek. Rovnoběžky byly nastaveny tak, že jedna snímá neopotřebovaný břit a druhá byla nastavena na velikost opotřebovaného nebo vylomeného břitu. Měření a obrábění bylo opakováno tak dlouho, dokud nebylo docíleno požadovaného limitního opotřebení nebo dostatečného vylomení břitu.



Obr. č. 34: Optický mikroskop

4.4 Řezné podmínky

Nejprve bylo nutné určit řezné podmínky pro obrábění a stanovit limitní opotřebení pro dané nástroje. Kriteriaální opotřebení břitu bylo zvoleno $VB_{lim} = 150 \mu\text{m}$ a kriteriaální vylomení břitu $VB_N = 200 \mu\text{m}$. Řezné podmínky byly voleny s ohledem na složení a tvrdost obráběného materiálu.



Obr. č. 35: Nástroje pro neprotvářený materiál

Nimonic 80A je chrom - niklová slitina, proto bylo nutno se držet řezných podmínek od výrobce daného nástroje. Pro neprotvářený materiál byly použity 3 frézy od třech různých výrobců. Pro obrábění protvářeného materiálu byly 2 frézy od třech různých výrobců. Každý výrobce doporučuje trochu odlišné řezné podmínky. Vzhledem k tomu, že se jednalo o speciální nástroje dělané pro daný typ materiálu, byly podmínky podobné. Z těchto řezných podmínek se zvolili průměrné hodnoty, aby bylo dosaženo stejných řezných podmínek pro všechny nástroje. Dalším důvodem, proč se zvolily stejné řezné podmínky, bylo, aby se dosáhlo lepších a věrohodnějších výsledků zkoušek.



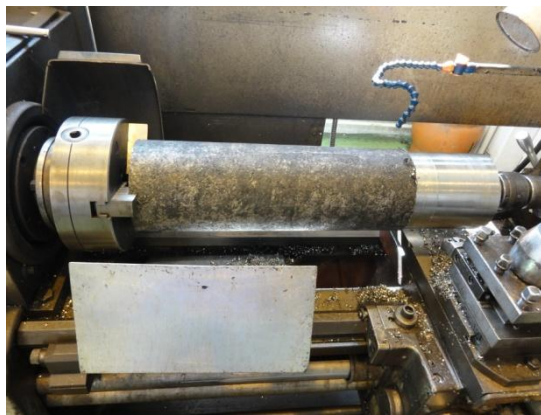
Obr. č. 36: Nástroje pro protvářený materiál

Řezné podmínky	
Řezná rychlost	46 [m/min]
Posuv na zub	0,085[mm/zub]
Hloubka řezu	2 [mm]
Šířka řezu	0,5 [mm]

Tab. č. 8: Použité řezné podmínky

4.5 Polotovar

Materiál byl dodán jako výkovek v nepracovaném stavu. Následně se musel obrobit na čistý materiál pro zkušební vzorek a uříznut na pásové pile do velikosti zkušební vzorku. Pro neprotvářený materiál byl použit kulatý vzorek o $D = 164 \text{ mm}$. Pro obrábění protvářeného materiálu měl zkušební vzorek tvar obdélníku o rozměrech 300×50 .



Obr. č. 37: Obrábění odlitého nimonicu na soustruhu

Nimonic 80A							
Prvek	Ni	Cr	Al	Ti	Fe	Mn	Si
Obsah [%]	Zbytek	19,28	1,13	2,17	1,75	0,81	0,66

Nimonic 80A			
Prvek	Cu	Co	C
Obsah [%]	0,014	-	0,06

Tab. č. 9: Chemické složení superslitiny v neprotvářeném stavu [2]

Tabulka ukazuje chemické složení odlitého materiálu. Při porovnání tohoto chemického složení s normou je patrné, že slitina byla dobře nalegována a obsah legur je v normě.

4.6 Použité nástroje

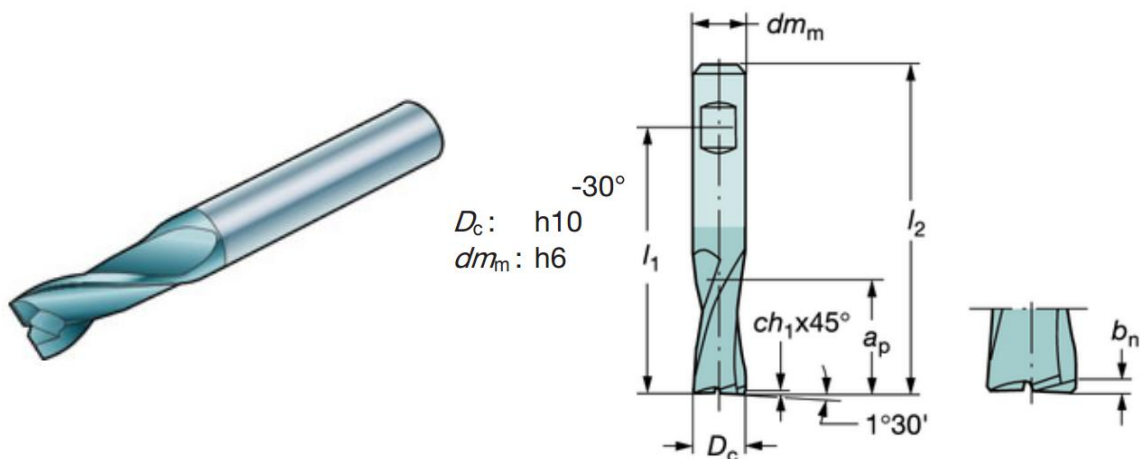
Pro měření byly použity dvoubřité čelní válcové monolitní frézy o průměru $D = 8$ mm. Frézy byly ze slinutého karbidu opatřené tenkou speciální vrstvou v řezné části. Každý nástroj měl svojí specifickou geometrii a to zejména v oblasti břitu nástroje.

Nástroj 2				
$\varnothing 8$	a_p [mm]	f_z [mm/zub]	v_c [m/min]	a_e [mm]
Nástroj 2	2	0,085	46	0,5

Tab. č. 10: Použité řezné podmínky pro nástroj č. 2

Nástroj č. 2	
Průměr	8 mm
Úhel čela v drážce	11,5 [°]
Úhel hřbetu na obvodě	9,5 [°]
Šířka řezky na obvodě	1,3 [mm]
Poloměr zaoblení břitu	2,05 [μm]
Délka břitu	16 mm
Délka nástroje	63 mm
Počet břitu	2

Tab. č. 11: Řezné úhly pro nástroj č. 2



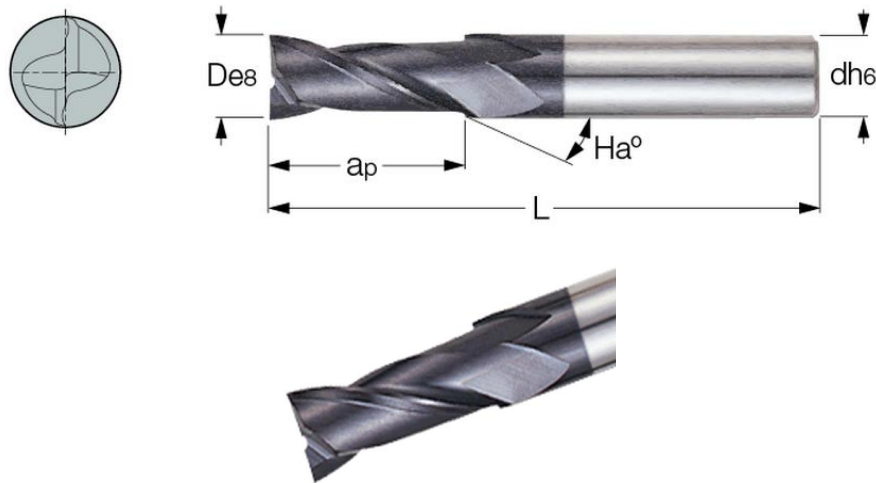
Obr. č. 38: Řezné úhly pro nástroj č. 2

Nástroj 1				
$\varnothing 8$	a_p [mm]	f_z [mm]	v_c [m/min]	a_e [mm]
Nástroj 1	2	0,085	46	0,5

Tab. č. 12: Použité řezné podmínky pro nástroj č. 1

Nástroj č. 1	
Průměr	8 mm
Úhel čela v drážce	7 [°]
Úhel hřbetu na obvodě	9,5 [°]
Šířka fazety na obvodě	1,4 [mm]
Poloměr zaoblení břitu	3,50 [μm]
Délka břitu	19 mm
Délka nástroje	60 mm
Počet břitu	2

Tab. č. 13: Řezné úhly pro nástroj č. 1



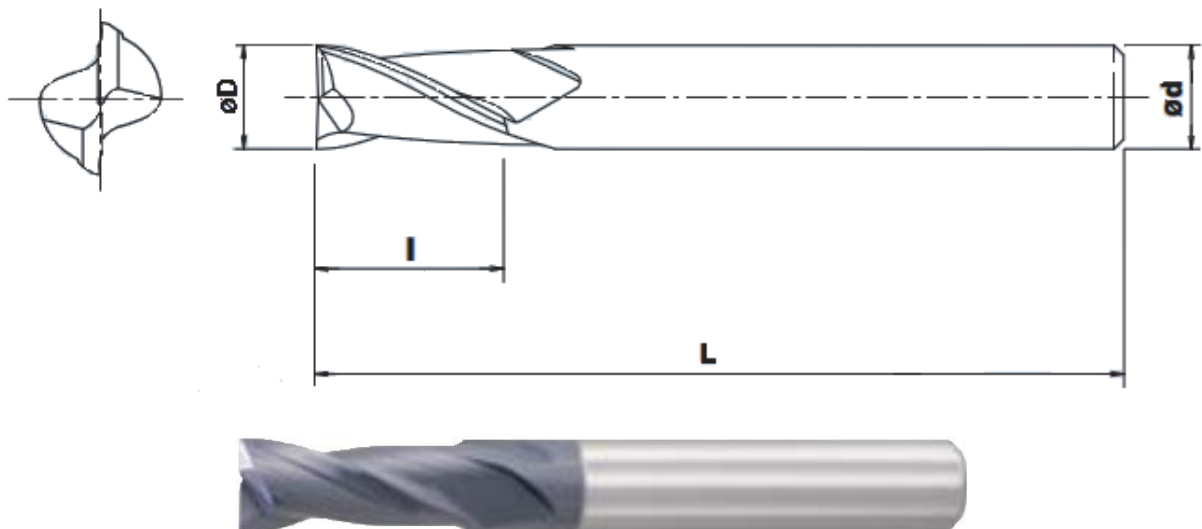
Obr. č. 39: Řezné úhly pro nástroj č.1

Nástroj 3				
$\varnothing 8$	a_p [mm]	f_z [mm]	v_c [m/min]	a_e [mm]
Nástroj 3	2	0,085	46	0,5

Tab. č. 14: Použité řezné podmínky pro nástroj č. 3

Nástroj č. 3	
Průměr	8 mm
Úhel čela v drážce	8 [°]
Úhel hřbetu na obvodě	14 [°]
Šířka fazety na obvodě	0,5 [mm]
Poloměr zaoblení břitu	1,85 [μm]
Délka břitu	19 mm
Délka nástroje	63 mm
Počet břitu	2

Tab. č. 15: Řezné úhly pro nástroj č. 3



Obr. č. 40: Řezné úhly pro nástroj č. 3

Nástroj 4				
$\varnothing 8$	a_p [mm]	f_z [mm]	v_c [m/min]	a_e [mm]
Nástroj 3	2	0,085	46	0,5

Tab. č. 16. Použité řezné podmínky pro nástroj č. 4

Nástroj č. 4	
Průměr	8 mm
Úhel čela v drážce	10,5 [°]
Úhel hřbetu na obvodě	10,5 [°]
Šířka fazety na obvodě	0,9 [mm]
Poloměr zaoblení břítu	4,85 [μm]
Délka břítu	15 mm
Délka nástroje	69 mm
Počet břítu	2

Tab. č. 12: Řezné úhly pro nástroj č. 4

4.7 Chladicí médium

Při obrábění vznikalo v místě řezu velké teplo vlivem špatné tepelné vodivosti obráběného materiálu. Z tohoto důvodu bylo nutno použít chladicí kapalinu. Bylo použito přídavné chlazení pomocí přídavné pistole, která byla umístěna na posuvném stole. Byla použita chladicí kapalina CimTECH501 koncentrace 6,2%.



Obr. č. 41: Upnutí přídavného chlazení

4.8 Měření drsnosti

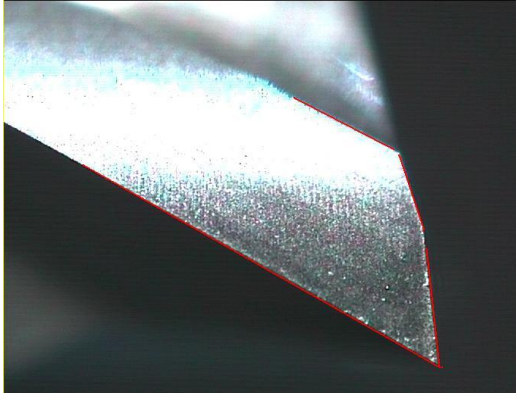
Drsnost byla měřena pomocí drsnoměru. Na drsnoměru byly hodnoceny hodnoty R_a , R_{max} a R_t . Drsnost byla změřena na obrobené ploše po přejetí nástroje.



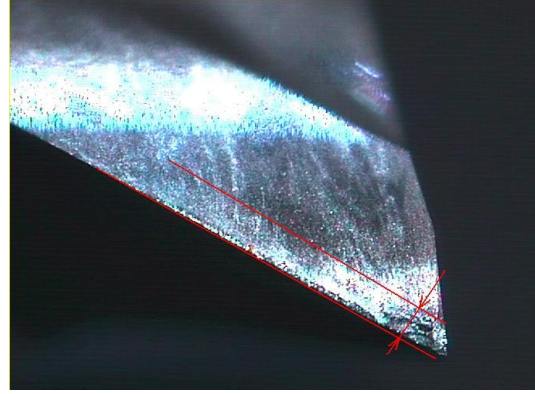
Obr. č. 42: Drsnoměr

5. Analýza dosažených výsledků

Vyhodnocení břitu frézy



Obr. č. 43: Nový břit



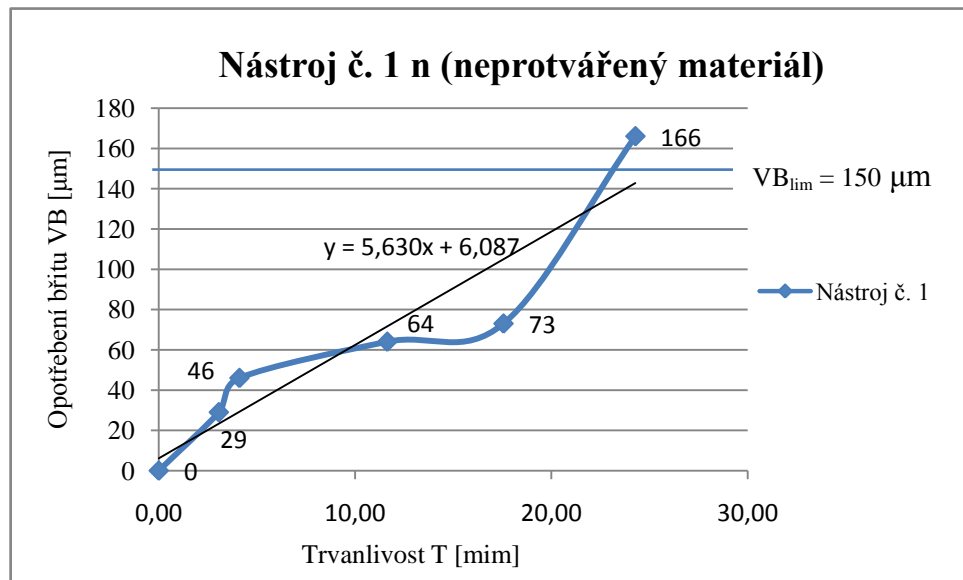
Obr. č. 44: Opotřebený břit

Obr. č. 43 ukazuje nový břit, zvětšený pomocí mikroskopu před obráběním. Tím bylo zkontrolováno, zda je břit před obráběním v pořádku a zda není mechanicky poškozen. Dále byla nastavena tzv. maska, která umožnila při opětovném měření nastavení břitu nástroje do stejné polohy. Mikroskop umožňoval změřit míru opotřebení na břitu frézy. Na mikroskopu byla nastavena jedna rovnoběžka na spodní hranu a druhá na velikost opotřebení. Díky programu, který poskytuje mikroskop je možnost změřit velikost opotřebení. Změřené opotřebení bylo uloženo pro následné vyhodnocení výsledků.

5.1 Vyhodnocení grafů

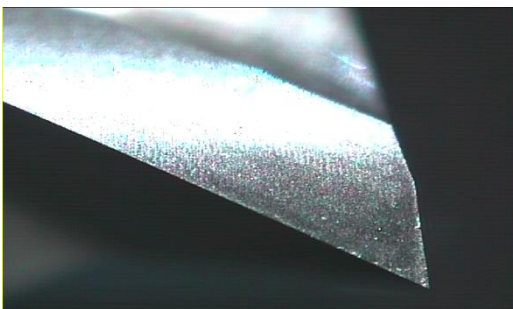
Neprotvářený materiál

Nástroj č. 1 n



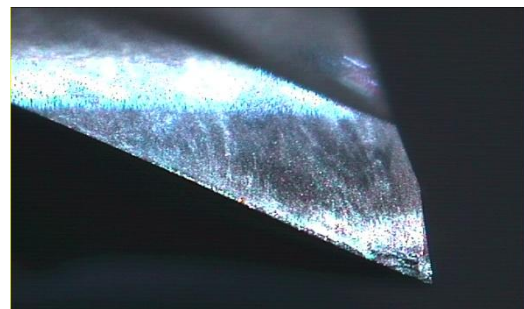
Graf č. 1: Průběh opotřebení nástroje č. 1 n u neprotvářeného materiálu

základní tvar



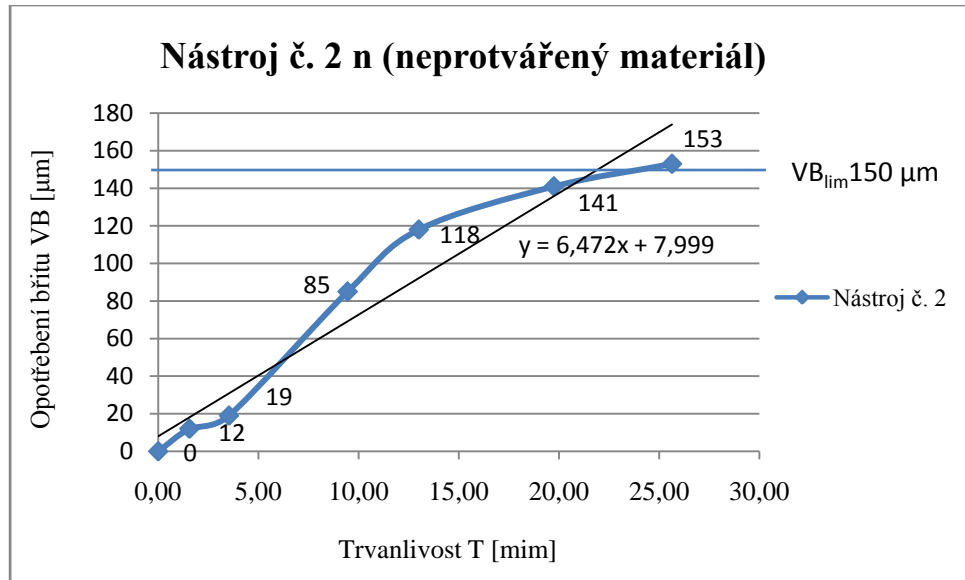
Obr. č. 45: Nový břit nástroje č. 1 n

opotřebení $VB_{\text{max}} = 166 \mu\text{m}$



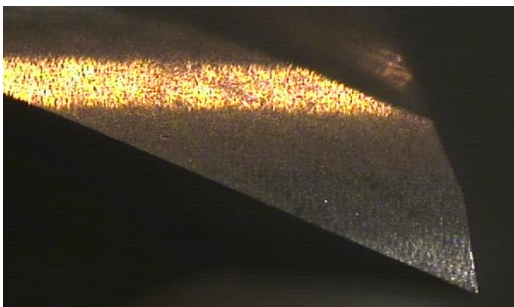
Obr. č. 46: Opotřeбенý břit nástroje č. 1 n

Nástroj dosáhl požadovaného limitního opotřebení $VB_{\text{lim}} = 150 \mu\text{m}$ bez větší problémů. Opotřebení narůstalo od začátku výrazně a ustálilo se kolem času $t = 5 \text{ min.}$ a následně narůstalo pozvolna. Při dosažení opotřebení $VB = 68 \mu\text{m}$, se začala postupně vylamovat špička nástroje. Vylomení špičky nástroje narůstalo až po dobu dosažení limitní trvanlivosti. Konečného opotřebení $VB_{\text{max}} = 166 \mu\text{m}$ se dosáhlo za času $t = 24,28 \text{ minuty.}$

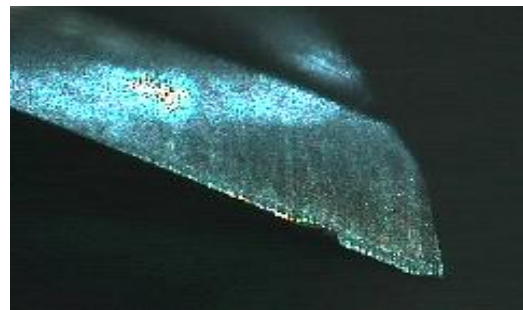
Nástroj č. 2 n

Graf č. 2: Průběh opotřebení nástroje č. 2 n u neprotvářeného materiálu

základní tvar

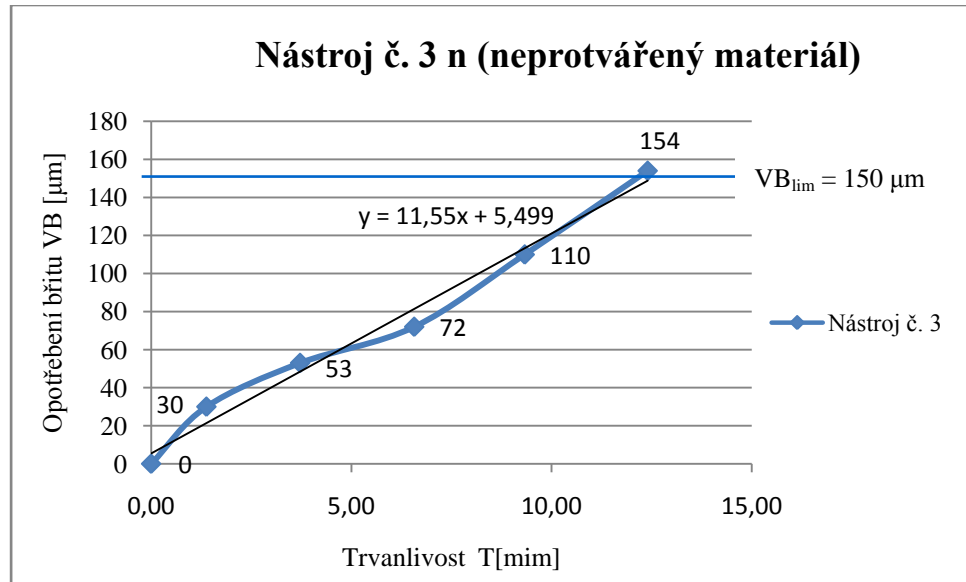


Obr. č. 47: Nový břit nástroje č. 2 n

opotřebení $VB_{\max} = 153 \mu\text{m}$ 

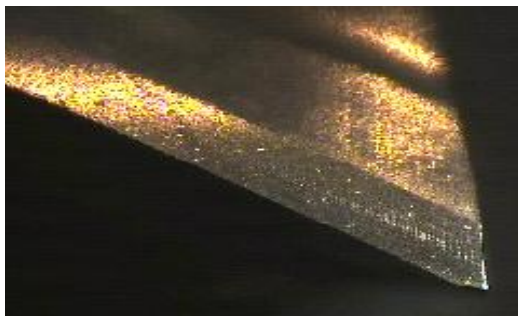
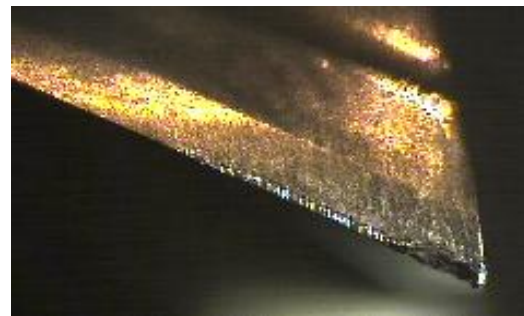
Obr. č. 48: Opotřeбенý břit nástroje č. 2 n

Opotřebení $VB_{\max} = 153 \mu\text{m}$ se dosáhlo za čas $t = 25,64$ minuty. Limitního opotřebení $VB_{\text{lim}} = 150 \mu\text{m}$ bylo dosaženo u všech měřených nástrojů. Opotřebení bylo výrazné už od samotného začátku obrábění a bylo výrazné po celé délce břitu. Rovnoměrně rostlo s časem obrábění. Při dosažení opotřebení kolem $VB = 110 \mu\text{m}$ se začal pozvolna vylamovat břit u všech tří fréz. U tohoto nástroje nedošlo k vylomení špičky.

Nástroj č. 3 n

Graf č. 3: Průběh opotřebení nástroje č. 3 n u neprotvářeného materiálu

základní tvar

opotřebení $VB_{max} = 154 \mu\text{m}$ 

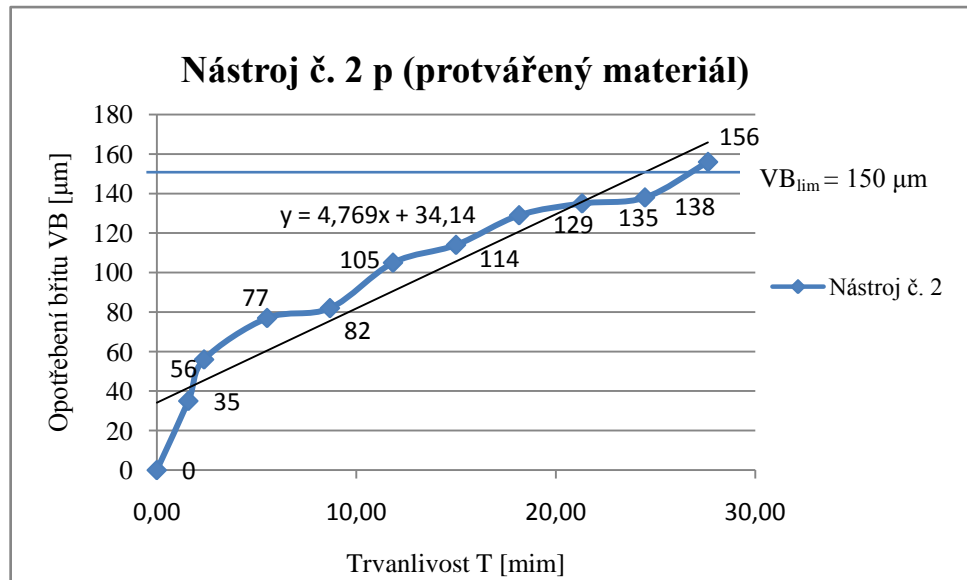
Obr. č. 49: Nový břit nástroje č. 3 n

Obr. č. 50: Opotřeбенý břit nástroje č. 3 n

U tohoto nástroje bylo dosaženo limitního opotřebení pouze u dvou nástrojů a to z toho důvodu, že při měření 3 nástroje se během 3 přejezdů materiálu zcela vylomil břit. Po bližším prozkoumání tohoto vylomení břitu a obráběného materiálu bylo zjištěno, že vylomení zapříčinil vměsek v materiálu. Předchozí dvě měření nástroje, měli podobný charakter otupení. Nástroj se pozvolna otupoval od samého začátku obrábění. Následně došlo k malému vylomení špičky, to zapříčinilo rychlejší opotřebení břitu. Dále se na břit nástroje v místě záběru nalepoval odebíraný materiál a vznikaly nárůstky. Opotřebení $VB_{max} = 154 \mu\text{m}$ se dosáhlo za čas $t = 12,40 \text{ min}$.

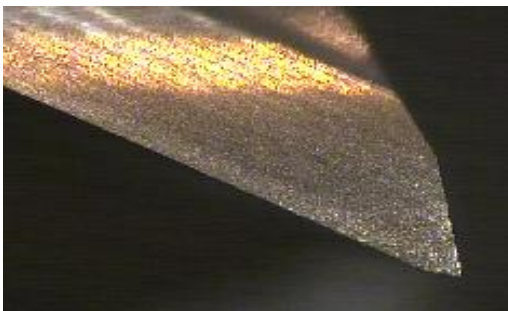
Protvářený materiál

Nástroj č. 2 p



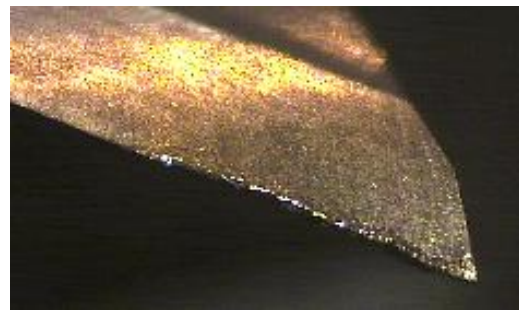
Graf č. 4: Průběh opořebení nástroje č. 2 p u protvářeného materiálu

základní tvar



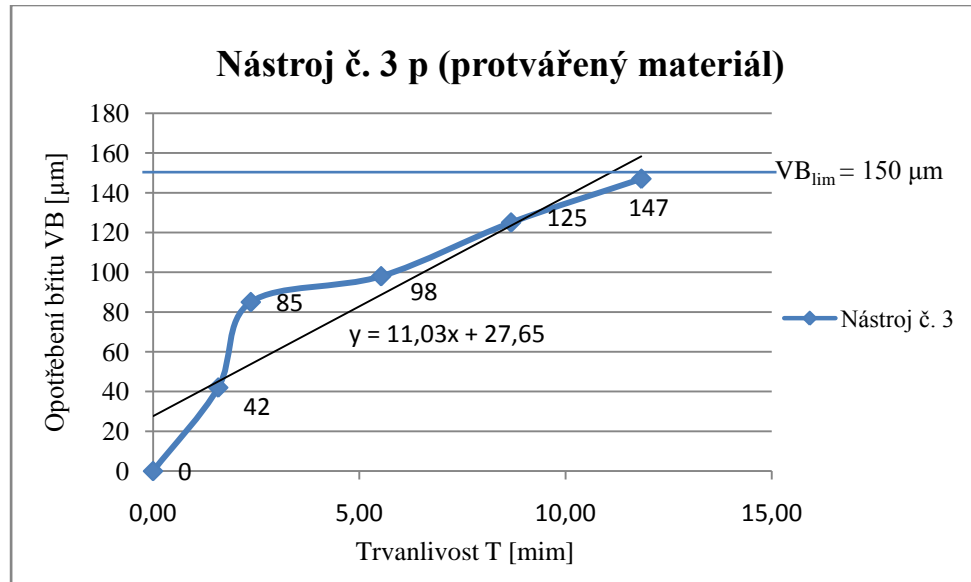
Obr. č. 51: Nový břit nástroje č. 2 p

opořebení $VB_{max} = 156 \mu m$



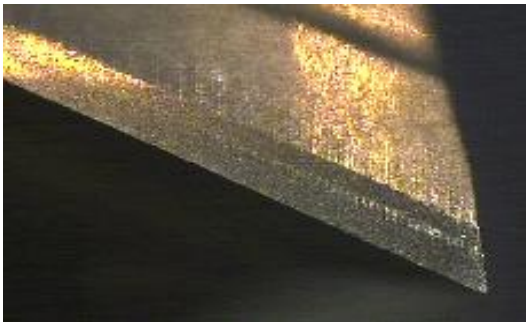
Obr. č. 52: Opořebený břit nástroje č. 2 p

Limitní opořebení bylo dosaženo u obou měřených nástrojů. Břit byl otupován do $VB = 77 \mu m$ výrazněji. Poté se opořebení ustálilo a k dosažení maximálního limitního opořebení $VB_{lim} = 150 \mu m$ se břit otupoval pozvolna. U tohoto nástroje se stejně jako u neprotvářeného materiálu nezačala vylamovat špička. K otupení břitu došlo vlivem obrušování bez jakéhokoliv výrazného vylomení již zmíněného břitu. Konečného otupení $VB_{max} = 156 \mu m$ se dosáhlo za čas $t = 27,63$ minuty.

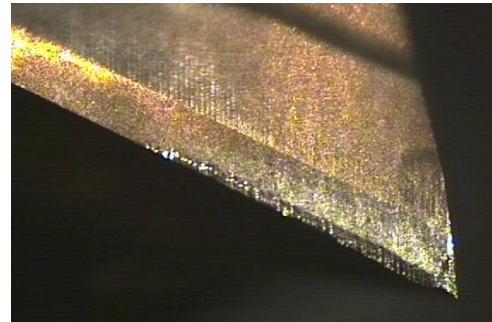
Nástroj č. 3 p

Graf č. 5: Průběh opotřebení nástroje č. 3 p u protvářeného materiálu

základní tvar

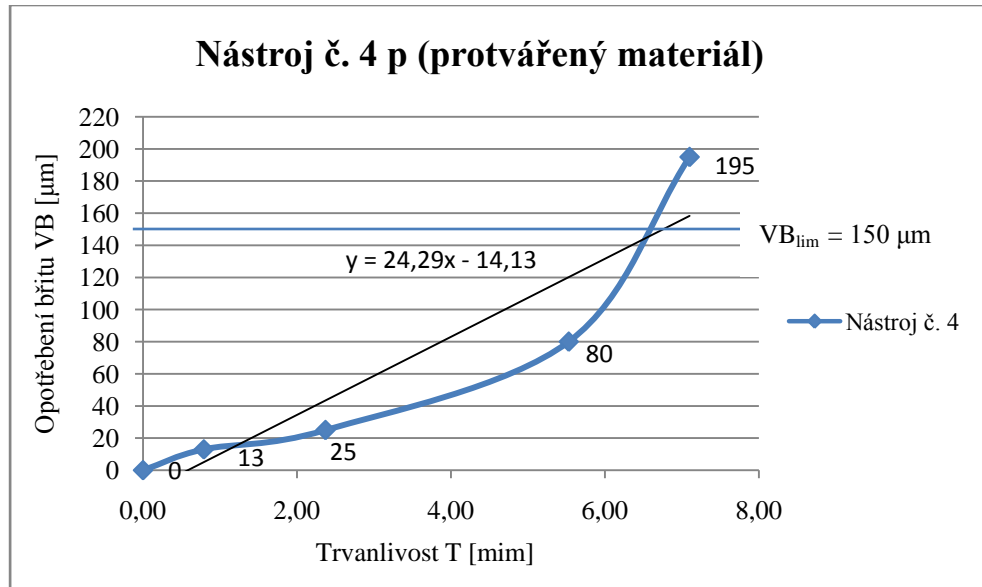


Obr. č. 53: Nový břit nástroje č. 3 p

opotřebení $VB_{max} = 147 \mu m$ 

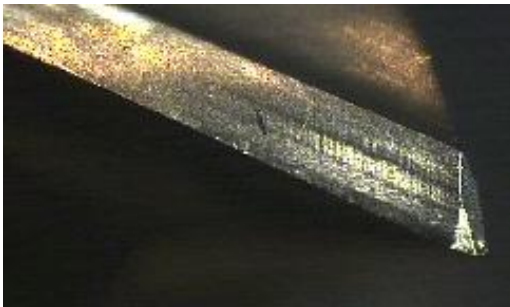
Obr. č. 54: Opotřeбенý břit nástroje č. 3 p

Limitní opotřebení $VB_{lim} = 150 \mu m$ nebylo dosaženo ani u jednoho měřeného nástroje. Průběh opotřebení měl patrný nárůst hned od začátku měření. Vylamování špičky nástroje se začalo projevovat od opotřebení $VB = 98 \mu m$, zvětšovalo se až do dosažení limitního vylomení špičky $VB_N = 200 \mu m$. Opotřebení $VB_{max} = 147 \mu m$ se dosáhlo za čas $t = 11,84$ minuty.

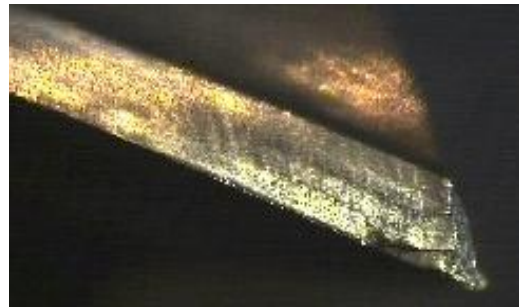
Nástroj č. 4 p

Graf č. 6: Průběh opotřebení nástroje č. 4 p u protvářeného materiálu

základní tvar



Obr. č. 55: Nový břit nástroje č. 4 p

opotřebení $VB_{max} = 195 \mu\text{m}$ 

Obr. č. 56: Opotřeбенý břit nástroje č. 4 p

Nástroj č. 4 p dosáhl opotřebení $VB_{max} = 195 \mu\text{m}$ za čas $t = 7,10$ minuty. Na začátku obrábění nebylo patrné otupení břitu ani špičky nástroje. Po celou dobu obrábění byl nárůst opotřebení minimální. Od opotřebení $VB = 60 \mu\text{m}$ se začala vylamovat špička nástroje. Následné rychlé vylamování špičky zapříčilo dosažení limitní trvanlivosti. Vylomení špičky nástroje bylo ze všech měřených nástrojů nejvýraznější.

5.2 Otřepy

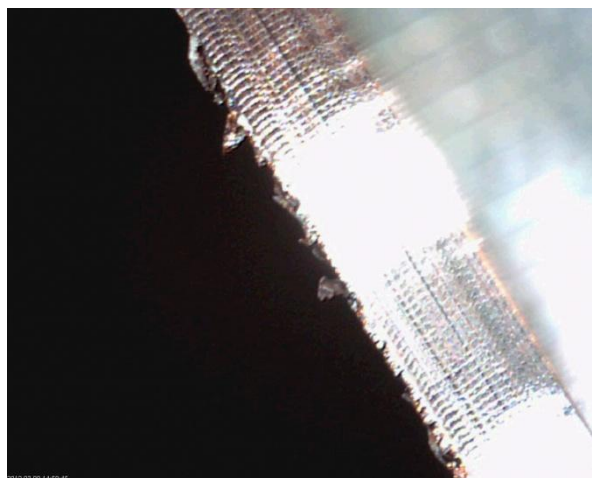
Při obrábění vznikaly poměrně velké otřepy jen zřídka. Na jejich tvorbu mělo vliv opotřebení nástroje. Pokud je nástroj při obrábění ostrý, otřepy se většinou nevyskytují. Naopak jak narůstalo opotřebení nástroje, vzrostlo nebezpečí jejich vzniku.

Největší otřepy se tvořily u nástroje č. 1 n při obrábění materiálu v neprotvářeném stavu. Nástroj byl opotřeben pozvolna a byl dostatečně ostrý, proto se během začátku obrábění nevytvářel otřep. Začal se vytvářet až ke konci obrábění vlivem výraznějšího otupení břitu, které trvalo delší dobu než u ostatních měřených nástrojů. To zapříčinilo postupné vznikání nárůstku na břitu a následný vznik otřepu na polotovaru.



Obr. č. 57 Otřep v neprotvářeném materiálu

U protvářeného materiálu nevznikaly tak výrazné otřepy jako u předešlého materiálu. Vznikaly spíše drobné otřepy. U těchto nástrojů docházelo k brzkému vylomení špičky a břit dosahoval rychlého otupení. Největší otřep vznikl u nástroje č. 2 p.



Obr. č. 58 Otřep v protvářeném materiálu

5.3 Vyhodnocení drsnosti

Drsnost byla měřena na měřící dráze $L_t = 1,50$ mm, posuvová rychlost byla $V_t = 0,15$ m/s. Drsnost se měřila na obrobené ploše po přejetí nástroje. I když se použili stejné řezné podmínky, většina obrobených ploch se lišila změřenými hodnotami. Na tuto změnu mělo vliv použití různých nástrojů od různých výrobců. Při porovnání drsností povrchu u protvářeného a neprotvářeného materiálu je vidět, že u neprotvářeného materiálu bylo dosaženo lepší drsnosti obrobené plochy. Hlavní důvod na zhoršení povrchu mělo protváření materiálu.

Nejlepší drsnost R_a dosáhl nástroj č. 2 a to u obou měřených materiálů. Aritmetická střední hodnota drsnosti se pohybovala kolem $R_a = 0,30$ μm . Břit byl dostatečně ostrý a nenastalo vylomení špičky nástroje.

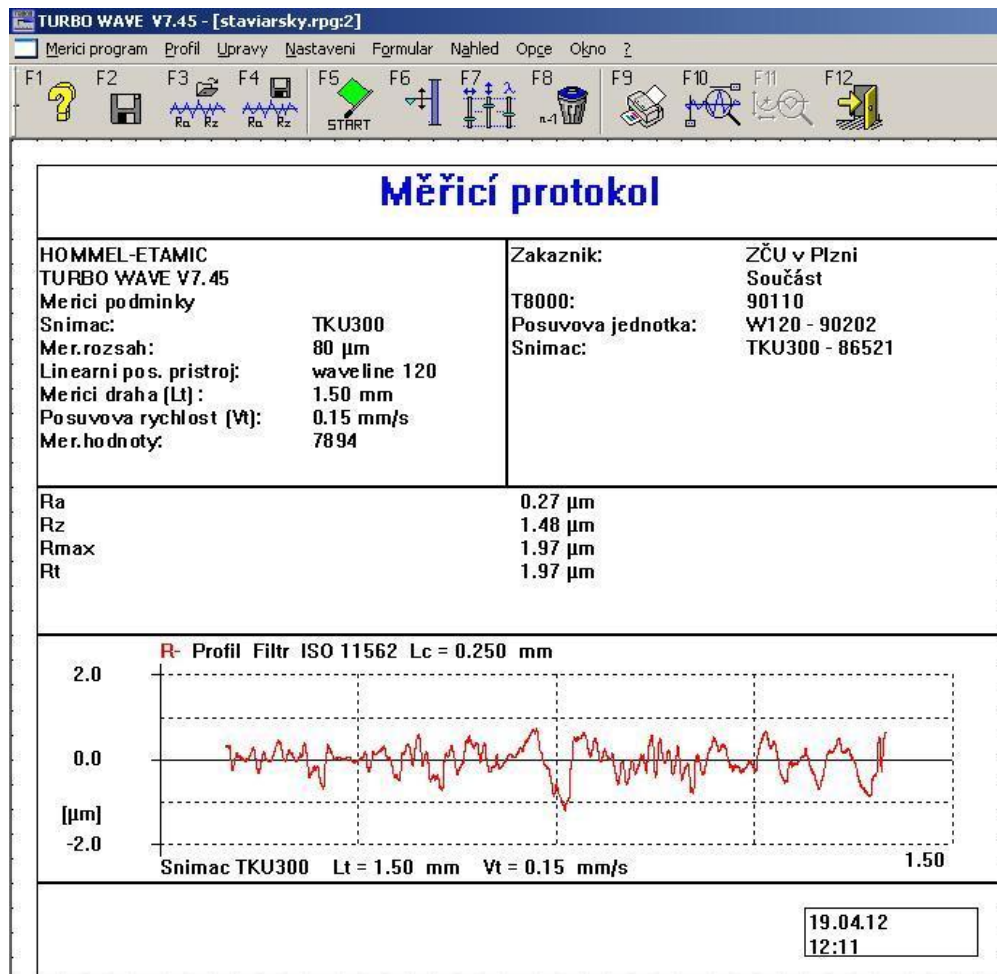
Jako nejhorší aritmetickou střední hodnotu drsnosti měl nástroj č. 4 p při obrábění protvářeného materiálu. Kdy se dosáhlo $R_a = 0,40$ μm . Na tuto hodnotu mělo vliv extrémní vylomení špičky nástroje u dvou měřených fréz.

Neprotvářený materiál	R_a [μm]	R_{max} [μm]	R_t [μm]
Nástroj č. 1	0,27	1,97	1,97
Nástroj č. 1	0,36	2,37	2,37
Nástroj č. 2	0,27	1,97	1,97
Nástroj č. 2	0,3	2,43	2,43
Nástroj č. 3	0,3	2,37	2,37
Nástroj č. 3	0,37	3,23	3,23

Tab. č. 13: Drsnosti po přejezdech v neprotvářeném materiálu

Protvářený materiál	R_a [μm]	R_{max} [μm]	R_t [μm]
Nástroj č. 2	0,31	1,75	1,79
Nástroj č. 2	0,34	2,83	2,83
Nástroj č. 3	0,75	4,69	4,69
Nástroj č. 3	0,35	2,58	2,56
Nástroj č. 4	0,33	2,29	2,50
Nástroj č. 4	0,43	3,71	3,71

Tab. č. 14: Drsnosti po přejezdech v protvářeném materiálu



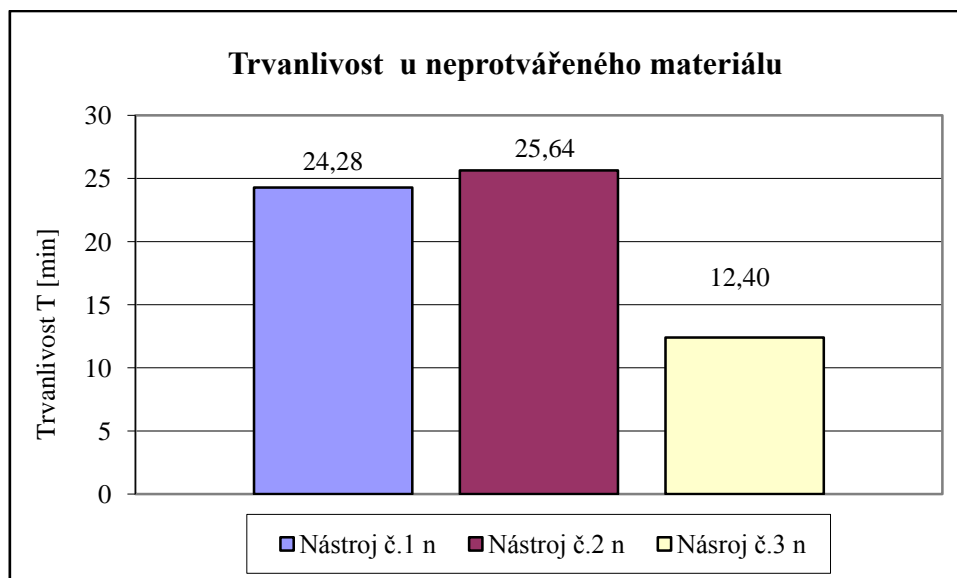
Obr. č. 59: Měřicí protokol z drsnoměru pro nástroj č. 1 n

Měřicí protokol byl vygenerován po změření drsnosti obrobené plochy. Měřicí protokol ukazuje velikost měřených hodnot R_a , R_{max} a R_t . Dále je na protokolu patrné, za jakých podmínek bylo měření prováděno a jaká byla např. měřicí dráha a posuvová rychlost. Protokol je vystaven pro každou změřenou obrobenou plochu.

5.4 Vyhodnocení trvanlivosti fréz

Pro neprotvářený materiál

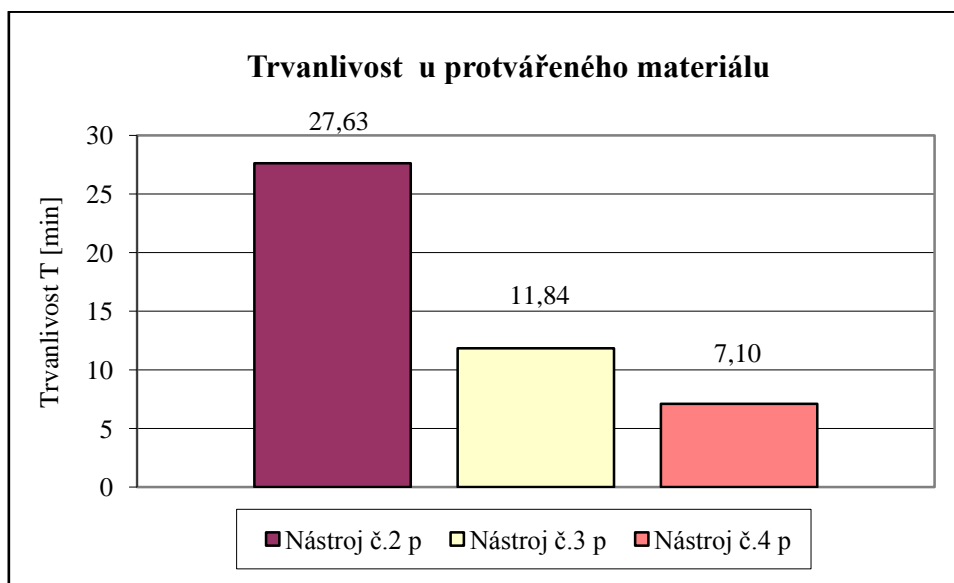
Nástroj č. 2 n měl nejdelší dobu trvanlivosti. Opotřebení břitu dosáhl nástroj 1 za $T = 25,64$ minuty. Druhou nejdelší trvanlivost dosáhl nástroj č. 1 n. Trvanlivost $T = 24,28$ minuty se od předešlého nástroje výrazně nelišila. Tento nástroj byl měřen jen u neprotvářeho materiálu. Nejnižší trvanlivosti dosáhl nástroj č. 3 n. a to hodnoty $T = 12,40$ minuty. V porovnání s nástrojem č. 2 n byla tato hodnota 50%.



Graf č. 7 Trvanlivost při obrábění neprotvářeného materiálu

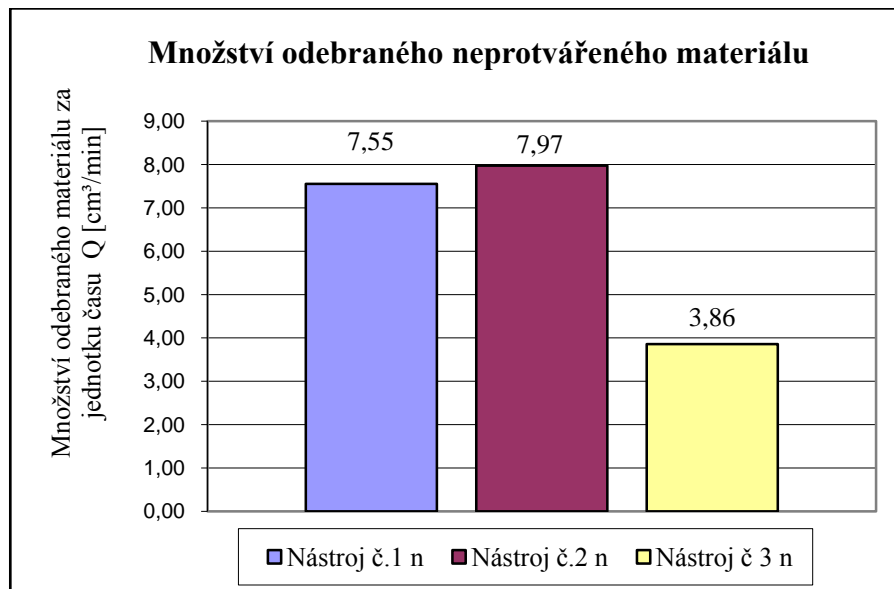
Pro protvářený materiál

Nástroj č. 2 p dosáhl nejdelší trvanlivost $T = 27,63$ minuty. Zároveň tento nástroj, měl nejdelší trvanlivost ze všech měřených nástrojů u obou materiálů. Nástroj č. 3 p dosáhl výrazně menší trvanlivosti. Ta byla $T = 11,84$ minuty. Trvanlivost tohoto nástroje se výrazně nelišila od trvanlivosti stejného nástroje při obrábění neprotvářeného materiálu. Nástroj č. 4 p dosáhl nejnižší hodnoty ze všech použitých nástrojů. U tohoto nástroje, byla trvanlivost $T = 7,10$ minuty. Tento nástroj byl měřen jen při obrábění protvářeného materiálu.

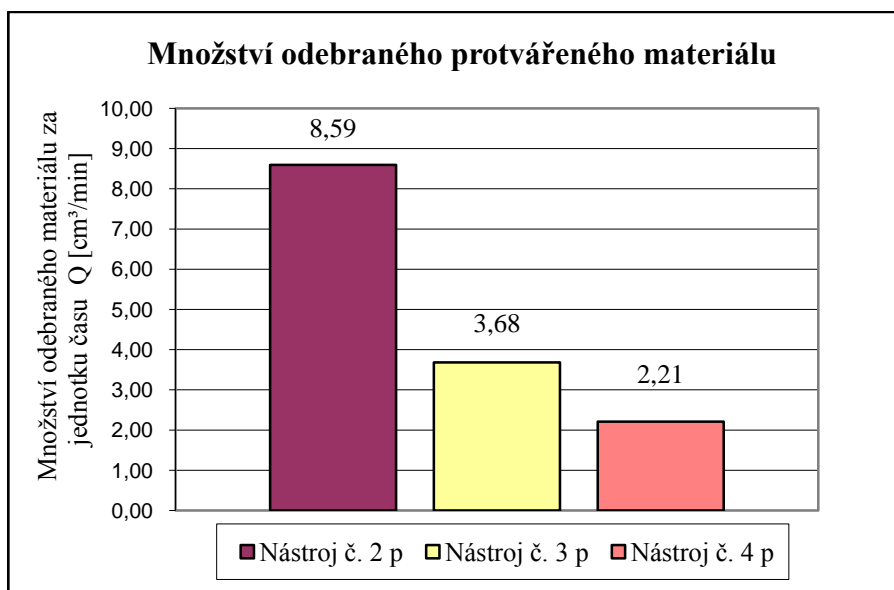


Graf č. 8: Trvanlivost při obrábění protvářeného materiálu

5.5 Úběr materiálu za jednotku času



Graf č. 9: Úběr materiálu za jednotku času v neprotvářeném materiálu

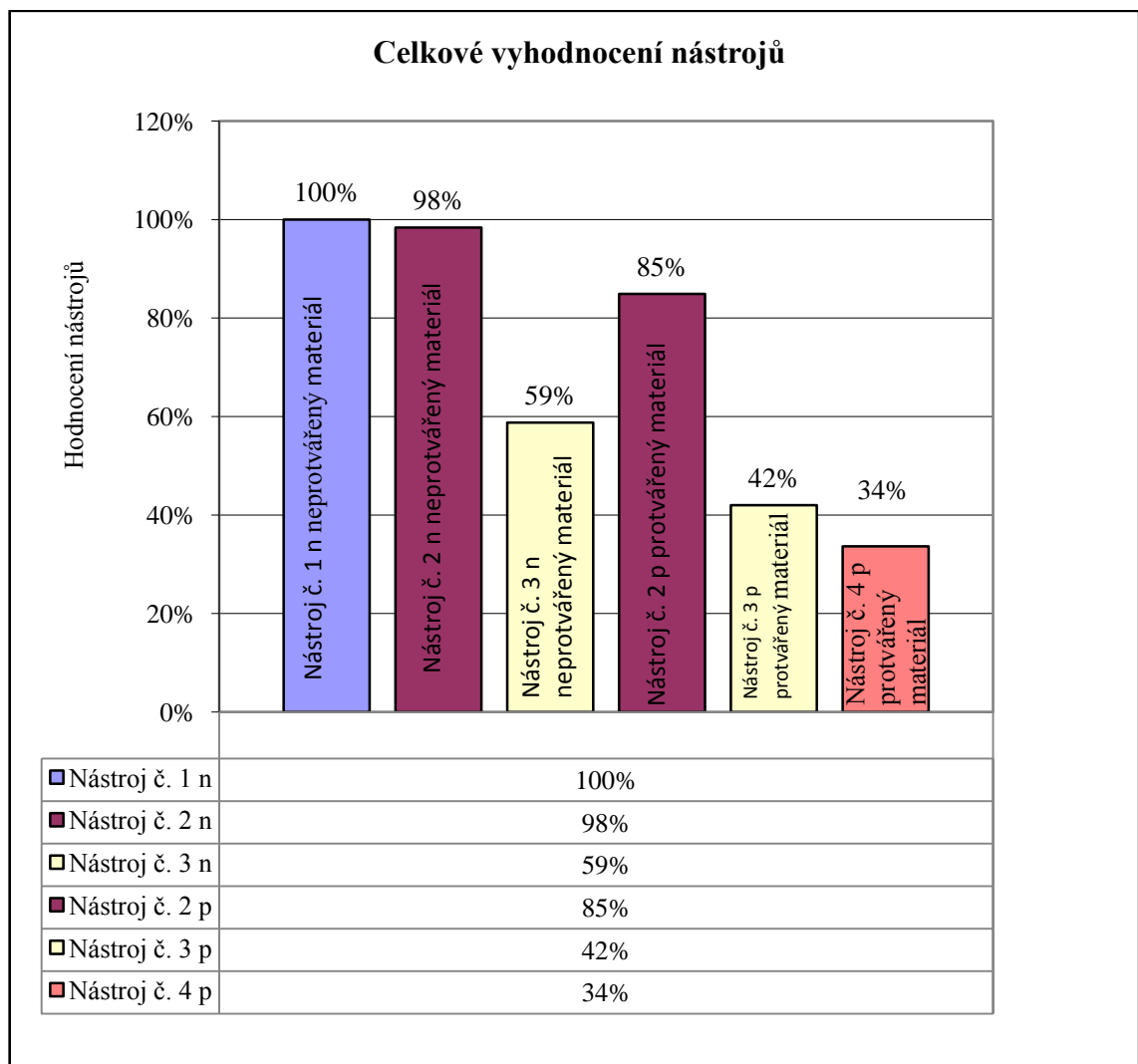


Graf č. 10: Úběr materiálu za jednotku času v neprotvářeném materiálu

Množství odebraného materiálu bylo vyhodnoceno jako množství, které odebere nástroj na 1cm^3 za dobu jedné minuty. Po vyhodnocení obou obráběných materiálů dosahoval nástroj č. 2 nejlepších výsledků u obou obráběných materiálů. Hodnota úběru u nástroje č. 1 n se lišila jen minimálně od nástroje č. 2 n. Vlivem extrémního vylomení špičky nástroje měl nejmenší úběr materiálu, měl nástroj č. 4 p.

5.6 Vyhodnocení nástrojů

Při celkovém porovnání nástrojů byly srovnány hodnoty trvanlivosti, úběru materiálu, drsnosti a otřepů. Nejvhodnější nástroj pro obrábění Nimonicu 80A v porovnání všech měřených hodnot, byl nástroj č. 1 n. Tento nástroj nebyl měřen v protvářeném stavu, proto nebylo možno porovnání. Druhý nejproduktivnější nástroj byl nástroj č. 2 n. U neprotvářeného materiálu se hodnota tohoto nástroje lišila jen minimálně od nástroje č. 1 n. U protvářeného materiálu dosáhl nástroj č. 2 p nejlepší hodnoty. Ale při porovnání s nástrojem č. 2 n byla tato hodnota o 15% menší. Nástroj č. 3 n dosáhl nejhorší hodnoty u neprotvářeného materiálu. Nástroj č. 4 p dosáhl nehoršího výsledku jak u protvářeného materiálu tak i celkově.



Graf č. 11: Celkové vyhodnocení nástrojů u obou materiálů

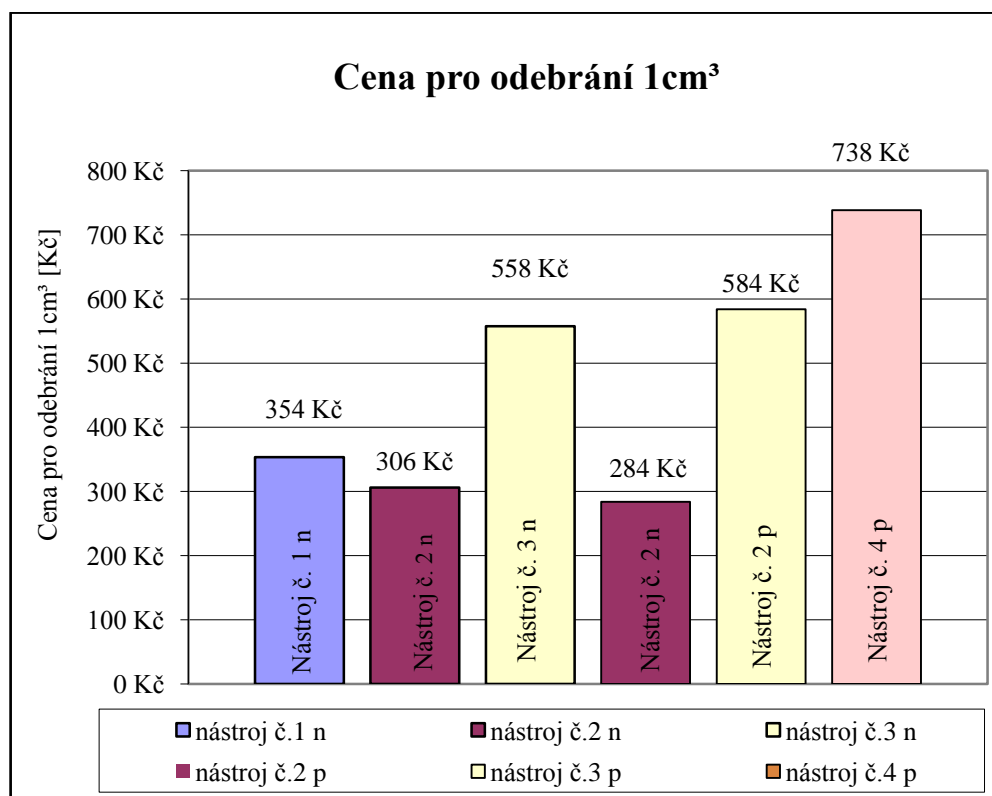
6. Ekonomické hodnocení

Při obrábění Nimonicu 80A je potřeba používat speciálních nástrojů. Tyto nástroje je potřeba vyrábět z kvalitních materiálů. Jejich cena výrazně vyšší, než kdybychom použili klasické nástroje, jako je např. rychlořezná ocel.

Ztrátové časy mají výrazný vliv na koncovou cenu výrobku. Hlavní příčinou těchto časů je předčasné otupení břitu nástroje nebo vylomení břitu. Tyto nežádoucí jevy vedou ke vzniku otřepů. Krátká trvanlivost nástroje má za následek jeho častou výměnu. Poté záleží na způsobu upnutí nástroje, a jak rychle ho lze nastavit a seřídít, aby bylo možno pokračovat ve výrobě.

Ekonomické hodnocení lze provést při vyhodnocení množství odebraného materiálu za jednotku času viz. graf č. 9 a graf č. 10. Nejlepších hodnot dosáhl nástroj č. 2 u obou měřených materiálů. Naopak nejhorší byl nástroj č. 4 p.

Hlavním faktorem jak lze hodnotit trvanlivost, je cena odebraného materiálu na 1cm^3 .



Graf č. 12: Celkové vyhodnocení nástrojů u obou materiálů

Nejnižší náklady na odebrání 1cm³ materiálu dosáhly u neprotvářeného materiálu nástroje č. 1 n a č. 2 n. U protvářeného materiálu měl nejnižší náklady nástroj č. 2 p. Úspora u těchto nástrojů byla při porovnání s ostatními nástroji zhruba 50%.

7. Závěr

Cílem diplomové práce bylo obrábění tzv. superslitiny Nimonic 80A. Používání tohoto materiálu je v dnešní době stále častější v leteckém a energetickém průmyslu a v mnoha dalších odvětvích. Z toho důvodu je třeba stále vytvářet lepší podmínky pro obrábění tohoto materiálu. Chceme dosáhnout větší trvanlivosti za použití větších řezných podmínek. To vede ke zproduktivnění výroby součásti a tím lepší ekonomičnosti výroby.

V této diplomové práci byla měřena trvanlivost nástrojů při obrábění Nimonicu 80A. Obráběný materiál byl v protvářeném a neprotvářeném stavu. Na výsledek měření mělo vliv protváření materiálu, protože tvářením se změnila jeho mechanické vlastnosti. Při obrábění bylo nutno použít chlazení, chladicí emulzí, jelikož obráběný materiál má špatnou tepelnou vodivost a vznikaly by velké teploty v místě řezu. Tento proces by zapříčinil vznik nárůstku a brzké opotřebení nástroje. Dále vznikaly drobné třísky, které bylo nutno odstranit z místa řezu. Trvanlivost se měřila na nástrojích ze slinutého karbidu o $\varnothing 8$ mm. Použité nástroje se lišily různou geometrií v řezné části. Různé geometrie se projeví na celkové trvanlivosti nástroje.

Při vyhodnocení všech měřených veličin dosáhl nejlepších hodnot nástroj č. 1 n při obrábění neprotvářeného materiálu. Pro obrábění protvářeného materiálu dosáhl nejlepších výsledků nástroj č. 2 p.

Nejlepší trvanlivost měl u obou měřených materiálů nástroj č. 2. Srovnatelnou hodnotu u neprotvářeného materiálu docílil nástroj č. 1 n. Nejhorší trvanlivost při obrábění neprotvářeného materiálu měl nástroj č. 3 n. U protvářeného materiálu dosáhl nejhorší trvanlivosti nástroj č. 4 p. Z grafu č. 11 je patrné, že protváření materiálu mělo vliv jak na trvanlivost nástrojů.

Pro obrábění Nimonicu 80A je zapotřebí použití speciálních nástrojů. Používanými nástroji, lze daný materiál obrábět, ale trvanlivost se u nástrojů výrazně liší. Dále cena použitých nástrojů je vysoká. Obrábění tohoto materiálu je v dnešní době ve vývoji a je zapotřebí zvýšit produktivitu těchto nástrojů. Tu lze zvýšit povrchovými úpravami na jeho řezné části a změnou řezných úhlů. Tyto změny jsou pouze teoretické. Proto je potřeba dalších experimentálních měření ke zjištění reálných výsledků.

Zvýšením produktivity nástrojů a snížením pořizovací ceny docílíme efektivního obrábění Nimonicu 80A. Z tohoto důvodu je potřeba zdokonalovat obrábění těchto materiálů a snažit se zvyšovat produktivitu obrábění těchto materiálů.

8. Seznam použité literatury

- [1] PROCHÁZKA, Tomáš. Vliv chemického složení a vlastností povrchu na chování litých niklových slitin. Diplomová práce v oboru, Materiálové inženýrství. Brno: VUT-FSI, Ústav materiálových věd a inženýrství. 2007. 75s.
- [2] DONACHIE, M.J A DONACHIE, S.J. SUPERALLOYS A Technical guide second edition. ASM INTERNATIONAL, 2002. 438 s. ISBN 087170-749-7.
- [3] KUDERA, Miroslav. Příručka obrábění. 1. Vydání. Praha: Sandvik, 1997, ISBN 91-972299-4-6.
- [4] HOFMANN P.: Výukové materiály KTO
- [5] Kříž, Antonín. Přednášky z předmětu SMA.
- [6] <http://www.planes.cz/cs/clanky/351/>
- [7] <http://www.hybrid.cz/toyota-chce-dosahnout-45-ucinnosti-motoru>
- [8] <http://www.allforpower.cz/clanek/vyuziti-expanderu-pri-redukci-tlakuzemnihoplynu/>
- [9] <http://www.pramet.com/indexc1b6.html>
- [10] <http://www.specialmetals.com/documents/Nimonic%20alloy%2080A.pdf>
- [11] Přednášky z předmětu STO a TO
- [12] Přednášky z předmětu EMO
- [13] Přednášky z předmětu DM
- [14] http://sps.watzke.cz/dl/KOM/ULOHA_3.1.4_MERENI_DRSNOSTI_POVRCHU.pdf
- [15] <http://www.coromant.sandvik.com/>
- [16] Mádl, Jan. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění: doplňkové skriptum. 4. vydání. Praha, 1990. ISBN 80-01-00323-X.

- [17] Forejt, Milan. Píška, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. Vydání. Brno, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

Seznam příloh

Příloha č. 1: Třiosé frézovací centrum MCV 750 A

Příloha č. 2: Optický mikroskop Multicheck PC500

Příloha č. 3: Drsnoměr

Příloha č. 4: Rotační dynamometr

Seznam obrázků

Obr. č. 1: Turbína	12
Obr. č. 2: Motor automobilu	12
Obr. č. 3: Trubky	12
Obr. č. 4: Obrobitelnost Nimonicu 80A	13
Obr. č. 5: Sousedné frézování	14
Obr. č. 6: Mřížka Kubická plošné centrovaná	14
Obr. č. 7: Zařazení Nimonicu do slitin	17
Obr. č. 8: Vytvrzování fáze γ'	19
Obr. č. 9: Destička S05F	20
Obr. č. 10: Destička GC1105	20
Obr. č. 11: Destička H13A	20
Obr. č. 12 Vlastnosti co ovlivňují trvanlivost	21
Obr. č. 13: Ukázka jak se opotřebovává břit	23
Obr. č. 14: Hlavní mechanismy otupení břitu	25
Obr. č. 15: Vlivy na tvar a velikost otupení břitu otěrem	27
Obr. č. 16: Závislost otěru na době řezání	28
Obr. č. 17: Další vlivy na časový průběh otupení VB	29
Obr. č. 18: Ukázka velkého otupení na nástroji	31
Obr. č. 19: Ukázka malého otupení na nástroji	31
Obr. č. 20: Průběh experimentu	33
Obr. č. 21 Vyhodnocení dlouhodobé zkoušky	33
Obr. č. 22: Logaritmická závislost T na v	33
Obr. č. 23: Aritmetická střední hodnota drsnosti	36
Obr. č. 24: Maximální drsnost	36
Obr. č. 25: Maximální drsnost	37
Obr. č. 26: Třiosé obráběcí centrum MCV 750A	38
Obr. č. 27: Upnutí neprotvářeného materiálu	39
Obr. č. 28: Upnutí protvářeného materiálu	39
Obr. č. 29: Neprotvářený materiál	39
Obr. č. 30: Protvářený materiál	39
Obr. č. 31: Upnutý dynamometr ve vřetenu	40

Obr. č. 32: Optika pro mikroskop	41
Obr. č. 33: PC propojený s Mikroskopem	41
Obr. č. 34: Optický mikroskop	42
Obr. č. 35: Nástroje pro neprotvářený materiál	42
Obr. č. 36: Nástroje pro protvářený materiál	43
Obr. č. 37: Obrábění odlitého nimonicu na soustruhu	44
Obr. č. 38: Řezné úhly pro nástroj č. 2	45
Obr. č. 39: Řezné úhly pro nástroj č. 1	45
Obr. č. 40: Řezné úhly pro nástroj č. 3	47
Obr. č. 41: Upnutí přídavného chlazení	48
Obr. č. 42: Drsnoměr	48
Obr. č. 43: Nový břit	49
Obr. č. 44: Opotřebený břit	49
Obr. č. 45: Nový břit nástroje č. 1	50
Obr. č. 46: Opotřebený břit nástroje č. 1	50
Obr. č. 47: Nový břit nástroje č. 2	51
Obr. č. 48: Opotřebený břit nástroje č. 1	51
Obr. č. 49: Nový břit nástroje č. 3	52
Obr. č. 50: Opotřebený břit nástroje č. 3	52
Obr. č. 51: Nový břit nástroje č. 2	53
Obr. č. 52: Opotřebený břit nástroje č. 2	53
Obr. č. 53: Nový břit nástroje č. 3	54
Obr. č. 54: Opotřebený břit nástroje č. 3	54
Obr. č. 55: Nový břit nástroje č. 4	55
Obr. č. 56: Opotřebený břit nástroje č. 4	55
Obr. č. 57 Otřep v neprotvářeném materiálu	56
Obr. č. 58 Otřep v protvářeném materiálu	56
Obr. č. 59: Měřicí protokol z drsnoměru pro nástroj č. 1	58

Seznam grafů

Graf č. 1: Průběh otupení nástroje č. 1 u neprotvářeného materiálu	50
Graf č. 2: Průběh otupení nástroje č. 2 u neprotvářeného materiálu	51
Graf č. 3: Průběh otupení nástroje č. 3 u neprotvářeného materiálu	52
Graf č. 4: Průběh otupení nástroje č. 2 u protvářeného materiálu	53
Graf č. 5: Průběh otupení nástroje č. 3 u protvářeného materiálu	54
Graf č. 6: Průběh otupení nástroje č. 4 u protvářeného materiálu	55
Graf č. 7 Trvanlivost při obrábění neprotvářeného materiálu	59
Graf č. 8: Trvanlivost při obrábění protvářeného materiálu	60
Graf č. 9: Úběr materiálu za jednotku času v neprotvářeném materiálu	61
Graf č. 10: Úběr materiálu za jednotku času v neprotvářeném materiálu	61
Graf č. 11: Celkové vyhodnocení nástrojů u obou materiálů	62
Graf č. 12: Celkové vyhodnocení nástrojů u obou materiálů	64

Seznam tabulek

Tab. č. 1: Norma chemického složení superslitiny	11
Tab. č. 2: Vlastnosti superslitiny	11
Tab. č. 3: Mez pevnosti	11
Tab. č. 4: Vlastnosti niklu	14
Tab. č. 5: Mechanické vlastnosti niklu	15
Tab. č. 6: Vlastnosti chromu	16
Tab. č. 7: Různé označení Nimonicu 80A	17
Tab. č. 8: Použité řezné podmínky	43
Tab. č. 9: Chemické složení superslitiny v neprotvářeném stavu	44
Tab. č. 10: Použité řezné podmínky pro nástroj č. 2	45
Tab. č. 11: Řezné úhly pro nástroj č. 2	45
Tab. č. 12: Použité řezné podmínky pro nástroj č. 1	46
Tab. č. 13: Řezné úhly pro nástroj č. 1	46
Tab. č. 14: Použité řezné podmínky pro nástroj č. 3	46
Tab. č. 15: Řezné úhly pro nástroj č. 3	46
Tab. č. 16: Použité řezné podmínky pro nástroj č. 4	47
Tab. č. 12: Řezné úhly pro nástroj č. 4	47
Tab. č. 13: Drsnosti po přejezdech v neprotvářeném materiálu	57
Tab. č. 14: Drsnosti po přejezdech v protvářeném materiálu	57

Příloha č. 1

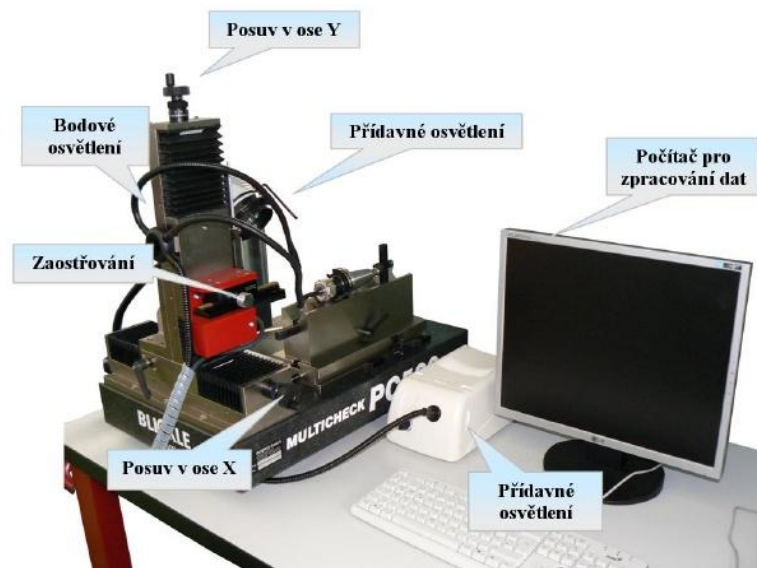
Třiosé frézovací centrum MCV 750 A

Technické parametry	
Typ obráběcího centra	MCV 750A
Druh	Vertikální obráběcí centrum
Počet CNC řízených os	16 kW
Výkon vřetena	20 - 13000 min ⁻¹
Změna otáček	Plynulá
Max. zdvih os X, Y, Z	750, 500, 500 mm
Rozměry upínacího stolu	1000x500 mm
Pracovní posuvy X,Y,Z	1 - 15000 mm.min ⁻¹
Rychloposuvy Y, Y, Z	25 m.min ⁻¹
Řídící systém	Heidenheind TNC 426



Příloha č. 2

Optický mikroskop Multicheck PC500



Horizontální měření

Měření: opotřebení u rotačních součástí

opotřebení u nerotačních součástí

úhlů

Regulace úhlu nástroje

Přesnost 0,001 μm

Rozsah: v ose x 0 – 150 mm

v ose y 0 – 150 mm

příslušenství mikroskopu: software WMS

vyměnitelné objektivy se zvětšením 10x, 30x, 75x, 150x.

Příloha č.3

Drsnoměr



Měřicí rozsah: do 350 μm

Počet měřicích drah 1 až 5

Vyhodnocované parametry: R_a , R_q , R_z , R_{max} , R_p , R_{pk} , R_k , R_{vk} , R_v , Mr_1 , Mr_2 , A_1 ,
 A_2 , V_o , R_t , R_{3z} , R_{Pc} , R_{mr} , R_{Sm} , R_{sk}

Tisk R-profilu (ISO/ASME/JIS) a záznamu měření.

Automatické nebo manuální nastavení stupnice.

Příloha č. 4

Rotační dynamometr Kistler typ 9123C

Pro upnutí a pro měření řezných sil byl použit čtyř-složkový rotační dynamometr. Pro vyhodnocení hodnot na PC byl použit programu LabVIEW. Aby byl dynamometr schopen přenést signál do PC je zapotřebí sběrové karty, která je zasunuta do PC a zesilovače.



Rotační dynamometr



PC s programem LabVIEW



Převodník signálu z dynamometru do PC



Zesilovač

Rozsah měření:

osy	$F_y = \pm 5$ [kN]
	$F_x = \pm 5$ [kN]
	$F_z = \pm 20$ [kN]
moment	$M_z = \pm 200$ [Nm]
Snímací frekvence: osy	$f_{nx} = 2$ [kHz]
	$f_{ny} = 2$ [kHz]
	$f_{nz} = 2$ [kHz]
	moment $f_{nMz} = 2$ [kHz]

Citlivost snímání: osy	$F_x = 2$ [mV/N]
	$F_y = 2$ [mV/N]
	$F_z = 0,05$ [mV/N]
	$M_z = 50$ [mV/N]
Provozní teploty:	0 – 60 [°C]
Otáčky:	10000 [1/min]
Váha:	3 [kg]
Výška:	52 [mm]
Průměr:	115 [mm]

