Volba řezných podmínek pro obrábění superslitin s ohledem na integritu povrchu

Ing. Jiří Kyncl

Vedoucí práce: prof. Ing. Antonín Zelenka CSc.

Abstrakt

V současné době lze zaznamenat nárůst produkce dynamicky namáhaných strojních součástí vyrobených z tzv. superslitin. Mezi super slitiny lze řadit materiály jako Inconel, Hastelloy, Waspaloy, Nimonic nebo Titat. Výhody těchto materiálů jsou využívány zejména v leteckém průmyslu, při výrobě turbín, v kosmonautice či výrobě součástí pracujících za tepla. Díky svým speciálním vlastnostem jsou superslitiny velice těžce obrobitelné materiály, což je dáno zejména jejich vysokou tepelnou odolností při obrábění. U superslitin a těžkoobrobitelných materiálů jsou parametry obráběcího procesu nastaveny tak, že obecně dochází k většímu tepelnému, silovému i napěťovému zatížení obrobku i nástroje, a je tedy klíčové znát vztah mezi celkovým nastavením obráběcího procesu a dosaženými hodnotami parametrů integrity povrchu. Kvalita výrobku je klíčová nejen k úspěchu na vysoce konkurenčních trzích, ale zejména s ohledem na oblasti jejich uplatnění, kterými jsou zejména letecký průmysl a energetika, což jsou obory známé svými přísnými požadavky z důvodů katastrofálních dopadů případných havárií.

Z tohoto důvodu bylo navrženo experimentální 4-osé frézování turbínových lopatek z materiálu Inconel 738 LC a Inconel 718 různými řeznými podmínkami. Následně bylo provedeno měření a vyhodnocení parametrů prvku profilu obrobených lopatek. Integrita povrchu je velice rozsáhlé téma, proto se tento článek zaměřuje pouze na hodnocení parametrů drsnosti povrchu po obrábění superslitin.

Klíčová slova

Frézování; Inconel 738 LC; Inconel 718; superslitiny; drsnost povrchu, integrita povrchu;

1. Úvod

V rámci dizertační práce "Výzkum integrity povrchu pro zavedení nových progresivních technologií výroby na 4 a 5-ti osých obráběcích centrech" byly odlity tyče ze slitiny Inconel 738 LC a Inconel 718 jako polotovary pro 4 osé obrábění turbínových lopatek. Lopatky byly následně obrobeny technologií 4 osého frézování různými řeznými podmínkami předem zvoleným řezným nástrojem. Účelem experimentu je zhodnocení drsnosti povrchu obrobených lopatek v závislosti na řezných podmínkách obrábění.

2. Superslitiny

Jako hlavní přednost superslitin, zejména niklových, lze chápat jejich tepelnou odolnost a schopnost si udržet mechanické a chemické vlastnosti při vysokých teplotách, vysoký bod tání, značná korozní odolnost včetně odolnosti vůči tvorbě oxidů doplněná o odolnost vůči teplotním šokům a creepu [6]. Tyto vlastnosti jsou důsledkem složité mikrostruktury i vlastní struktury jednotlivých krystalických fází, komplexního charakteru hranic zrn, přítomnosti defektů (zejména vakancí, vrstvených chyb a dislokací) a distribuce makroskopických,

mikroskopických a submikroskopických zbytkových napětí v jednotlivých fázích a v oblastech rozhraní.

2.1 Inconel 738 LC

Jedná se o vysoko pevnostní, korozivzdornou polykrystalickou superslitinu na bázi Ni, která je zpevněna koherentními precipitáty na bázi A3B (Ni3Al, Ni3AlTi).
Jde o nízkouhlíkovou modifikaci slitiny Inconel 738. Tato superslitina se používá na výrobu vysokoteplotně namáhaných součástí v leteckém a energetickém průmyslu a to především díky svým výjimečným mechanickým vlastnostem, strukturní stabilitě za vysokých teplot a odolnosti vůči oxidaci či korozi. Výrobky z Inconelu 738LC jsou schopny provozu až do cca 750°C.
Mechanické vlastnosti při 20 °C jsou Rm ≥ 927 MPa, Rp0,2 ≥ 772 MPa, A5 > 4 %. Dále creepové charakteristiky jsou kontrolovány při teplotě 870 °C (RmT ≥ 309 MPa s minimální dobou do lomu 50 hodin).
Chemické složení je v následující tabulce 1.

Tabulka 1. *– Chemické složení INCONEL 738 LC [5]*

INCONEL 738LC	**Prvek (v % hmotnosti)**							
	Ni	**Cr**	**Fe**	**Mo**	**Nb**	**Co**	**Ta**	**Cu**
	zbytek	15,9	0,15	1,74	0,88	8,26	1,65	-
	Prvek (v % hmotnosti)							
	Al	**Ti**	**Zr**	**C**	**S**	**P**	**W**	**B**
	3,3	3,3	0,03	0,11	-	-	2,54	0,008

2.2 Inconel 718

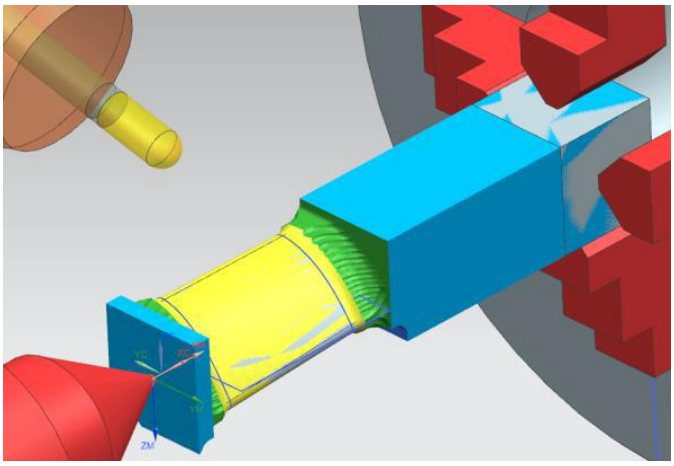
Slitina Inconel 718 se uplatňuje v plynových turbínách a výfukových systémech jako materiál pro tlakové nádoby nebo pro nádrže raket pro tuhá paliva [5].
I tento materiál je nutné tepelně zpracovávat, aby měl požadované vlastnosti. Tepelné zpracování se skládá z rozpouštěcího žíhání při teplotě 980oC po dobu 1 hodiny a chladnutí na vzduchu, následným stárnutím (precipitačním žíháním) při teplotě 720°C po dobu 8 hodin. Následuje zchlazení na 620°C kde se vydrží 18 hodin a proces konči pomalým chladnutím na vzduchu.
Mechanické vlastnosti jsou Rm = 1205 MPa, Rp0,2=1105 MPa, A5 = 17%.
Chemické složení je v následující tabulce 2.

Tabulka 2. *– Chemické složení INCONEL 718 [5]*

INCONEL 718	**Prvek (v % hmotnosti)**							
	Ni	**Cr**	**Fe**	**Mo**	**Nb**	**Co**	**Mn**	**Cu**
	50,0 – 55,0	17,0-21,0	Zůstatek	2,8-3,3	4,75-5,5	1	0,35	02,-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	

3. Experiment

Cílem celého experimentu je ověření vlivu řezných podmínek na výsledné drsnosti povrchu turbínových lopatek z materiálu Inconel 738 LC a Inconel 718.
Pro tento experiment byla vybrána lopatka, jejíž geometrie obsahuje komplexní tvarové i rovinné plochy. Technologie použitá pro výrobu této lopatky spočívá ve výrobě odlitku polotovaru ve tvaru hranolu a následného hrubování tvaru lopatky frézováním a konečného víceosého dokončení frézováním listu lopatky, viz. Obrázek 1.



Obr. 1. *Model experimentální lopatky*

K frézování byl použit stroj MCFV 1260 od výrobce Tajmac ZPS, a.s. Tento původně 3 osý stroj byl vybaven dodatečným přídavným stolem pro kontinuální obrábění a hydraulicky ovládaným koníkem, který slouží pro stanovení a udržení přesné polohy polotovaru.
Pro experiment dokončovacího frézování byla zvolena monolitní válcová fréza se zaoblením od výrobce Guehring s označením N05 - 3563 DIN 6527L R-NH 6 břitá 10,000x72x22 R1.

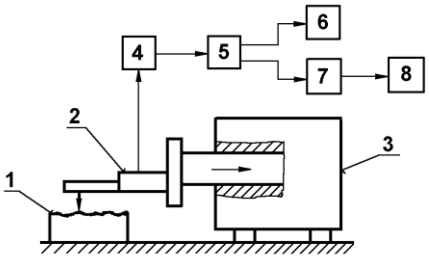
4. Způsob a postup měření

K měření parametrů drsnosti povrchu byla navržena a používá se celá řada metod, které lze rozdělit do čtyř skupin – na metody:

- porovnávací
- dotykové
- světelného řezu
- s využitím interference světla

Pro měření parametrů drsnosti povrchu byla zvolena metoda dotyková pomocí profiloměru. Popis profiloměru je následující:

1. měřená součást
2. snímací hlavice s měřicím hrotem
3. posuvový mechanismus
4. zesilovač
5. filtr
6. registrační jednotka
7. jednotka zpracovávající měřicí signál
8. zobrazovací jednotka



Obr. 2. *Popis profiloměru*

Mechanická část:

- stolek, na který se umísťuje měřená součást,
- rameno se snímacím hrotem, které se pohybuje určitou konstantní rychlostí a snímací hrot snímá nerovnosti povrchu,
- přímočarý vratný pohyb je zajištěn pomocí elektromotorku, popř. pneumaticky.

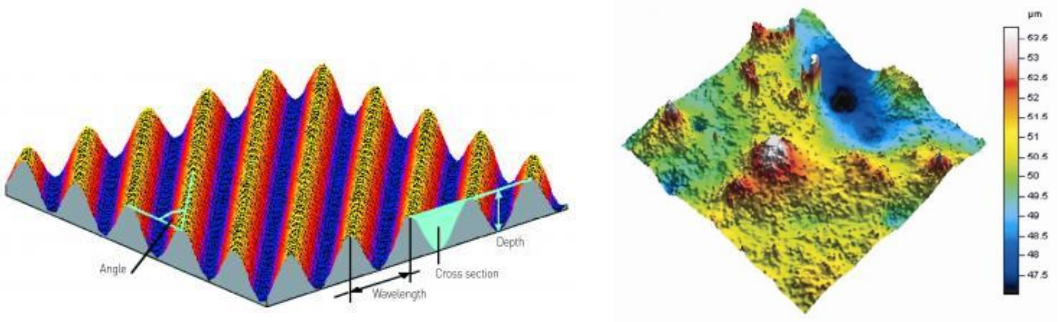
Elektronická část:

- transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu
- měřené plochy na elektrický signál, který se zpracovává (číselná hodnota příslušného
- parametru drsnosti nebo grafický záznam nerovnosti povrchu).

Měření probíhalo na profiloměru MAHR MarSurf XCR 20 vybaveným posuvovou jednotkou PGK a snímačem MFW-250 tracing arm 6851805. Na následujícím obrázku je znázorněno měření parametrů prvku profilu obrobených lopatek.

Obr. 3. *Měření drsnosti na obrobených lopatkách*

Volba vhodného filtru závisí na směru nerovností, které při každém obrábění nebo povrchové úpravě materiálu vznikají na jeho povrchu jako stopy. Ty jsou prostorově uspořádány a jejich vyhodnocení je technologicky náročné. Proto se nejčastěji používá zjednodušená metoda měření drsnosti povrchu v jednom řezu těchto nerovností. Směr nerovností na povrchu může být buď výrazný (periodický) nebo nevýrazný (aperiodický). Periodický povrch vzniká při soustružení, frézování, vrtání či broušení, tedy v případě, kdy nástroj vytváří na povrchu součásti rýhy v určitém směru. Aperiodický povrch vzniká při odlévání, kování, nanesením vrstvy nebo broušení.

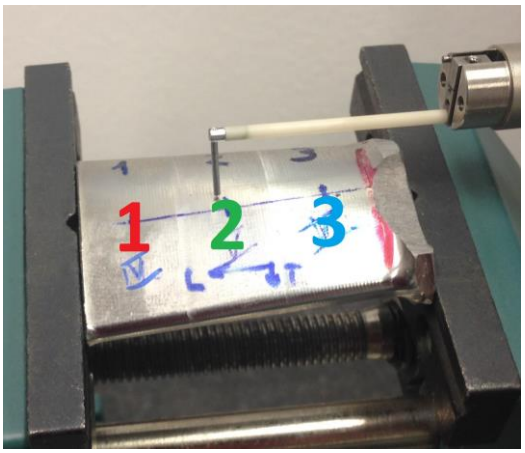


Obr. 4. *Povrch periodický (vlevo) a povrch aperiodický (vpravo)*

Pokud se jedná o povrch perodický, pak se volí vhodný filtr profilu λC, po prvním zkušebním náměru profilu, dle délkového parametru Rsm, jímž se označuje střední délka prvků drsnosti. Jedná-li se o povrch aperiodický, pak se volí vhodný filtr profilu λC, po prvním zkušebním náměru profilu, dle výškového parametru drsnosti Ra, jímž se označuje průměrná aritmetická úchylka prvků drsnosti.
V případě obrobených lopatek se jedná o finální povrch, který vznikal frézováním válcovou frézou o průměru 10mm se zaoblením R1. Jedná se tedy o povrch periodický, kde byl pro každý měřený vzorek po prvním zkušebním náměru zvolen vhodný filtr dle naměřené střední délky prvků drsnosti Rsm.

5. Výsledky měření

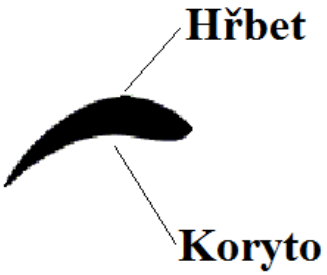
V rámci experimentu byly změřeny parametry drsnosti povrchu po obrábění lopatek z materiálu Inconel 738 LC a Inconel 718, které byly obrobeny různými řeznými. Parametry drsnosti povrchu byly měřeny na každé z lopatek ve třech oblastech viz.obr.5. Každá z oblastí odpovídá jiným řezným podmínkám. Pro každou oblast byl použit nástroj nový.



Obr. 5. *Jednotlivé řezy měření parametrů drsnosti povrchu*

Výsledky měření parametrů drsnosti povrchu na obrobených plochách a lopatkách budou pro přehlednost rozděleny na Inconel 738LC a na Inconel 718.

Pro vysvětlení pojmů hřbet a koryto lopatky slouží následující obrázek 6.



Obr. 6. *Vysvětlení pojmů hřbet a koryto lopatky*

Výsledky měření parametrů drsnosti povrchu pro Inconel 738LC jsou uvedeny v tab.3 a pro Inconel 718 jsou uvedeny v tab.4.

Tabulka 3. *– Výsledky měření drsnosti povrchu po obrábění Inconelu 738LC*

Nástroj	Obr.tvar	Oblast	Řezné podmínky				Drsnost	
			f_Z	a_P	a_E	v_C	Ra	Rz
			[mm/z]	[mm]	[mm]	[m/min]	[um]	[um]
V10 - 6břit - R1	Hřbet	1	0,04	0,5	1,5	42	0,476	2,195
V10 - 6břit - R1	Koryto	1	0,04	0,5	1,5	42	0,423	1,983
V10 - 6břit - R1	Hřbet	2	0,07	0,5	1,5	42	0,391	1,811
V10 - 6břit - R1	Koryto	2	0,07	0,5	1,5	42	0,467	2,331
V10 - 6břit - R1	Hřbet	3	0,1	0,5	1,5	42	0,804	4,116
V10 - 6břit - R1	Koryto	3	0,1	0,5	1,5	42	0,666	3,345

Tabulka 4. *– Výsledky měření drsnosti povrchu po obrábění Inconelu 718*

Nástroj	Obr.tvar	Oblast	Řezné podmínky				Drsnost	
			f_Z	a_P	a_E	v_C	Ra	Rz
			[mm/z]	[mm]	[mm]	[m/min]	[um]	[um]
V10 - 6břit - R1	Hřbet	1	0,07	0,5	1,5	42	0,479	2,402
V10 - 6břit - R1	Koryto	1	0,07	0,5	1,5	42	0,418	2,058
V10 - 6břit - R1	Hřbet	2	0,1	0,5	1,5	42	0,474	2,415
V10 - 6břit - R1	Koryto	2	0,1	0,5	1,5	42	0,49	2,497
V10 - 6břit - R1	Hřbet	3	0,13	0,5	1,5	42	0,486	2,393
V10 - 6břit - R1	Koryto	3	0,13	0,5	1,5	42	0,556	2,8
V10 - 6břit - R1	Hřbet	1	0,17	0,5	1,5	42	0,595	2,794
V10 - 6břit - R1	Koryto	1	0,17	0,5	1,5	42	0,474	2,331
V10 - 6břit - R1	Hřbet	2	0,2	0,5	1,5	42	0,856	4,604
V10 - 6břit - R1	Koryto	2	0,2	0,5	1,5	42	0,674	3,39
V10 - 6břit - R1	Hřbet	3	0,23	0,5	1,5	42	0,669	3,082
V10 - 6břit - R1	Koryto	3	0,23	0,5	1,5	42	0,758	3,875

6. Závěr

Z analýzy měření parametrů povrchu obrobených ploch Inconelu 738LC (tab.3) a zároveň z analýzy opotřebení jednotlivých nástrojů je výsledkem volba optimálních řezných podmínek pro 4-osé obrábění superslitiny Inconel 738 LC, tyto hodnoty jsou znázorněny v tab.3 žlutou barvou.

Vzhledem ke skutečnosti, že Inconel 718 je snáze obrobitelný než Inconel 738 LC, byl pro experiment obrábění tohoto materiálu zvolen větší rozsah řezných podmínek. Z analýzy měření parametrů povrchu obrobených lopatek z Inconelu 718 (tab.4) je výsledkem volba optimálních řezných podmínek pro 4-osé obrábění superslitiny Inconel 718, tyto hodnoty jsou znázorněny v tab.4 žlutou barvou.

V závěru tohoto článku je nutné zmínit, že z pohledu integrity povrchu turbínových lopatek, tento článek pojednává pouze o velmi úzké části této problematiky, jakou jsou parametry drsnosti povrchu. Pro komplexní analýzu integrity povrchu těchto turbínových lopatek bude dále nutné provézt měření geometrické přesnosti obrobených lopatek s ohledem na jejich

model, analýzu tvrdosti a zpevnění povrchu a v neposlední řadě také analýzu průběhu a změny zbytkových napětí v povrchu lopatky.

Seznam symbolů

Ra	střední aritmetická úchylka profilu	(μm)
Rz	výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	(μm)
fz	posuv na zub	(mm)
a_P	hloubka řezu	(mm)
a_E	příčný krok	(mm)
v_C	řezná rychlost	(m/min)
Rm	mez pevnosti	(MPa)

Seznam použité literatury

[1] http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf
[2] http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/100_1.pdf
[3] http://www.proinex.cz/1-inspekcni-pristroje%C2%A0pro-povrchove-upravy/priprava-povrchu/drsnost-povrchu-drsnomery.html
[4] http://www.proinex.cz/1-inspekcni-pristroje%C2%A0pro-povrchove-upravy/priprava-povrchu/drsnost-povrchu-drsnomery.html
[5] *Holešovský, F., Hrala, M. Integrity of Ground Cylindrical Surface. Journal of Materiál Processing Technology. No.: 153-154 (2004), .714-721, ISSN 0924-0136*
[6] *Y.B. Guo, W. Li, Mach. Sci. Tech. 13 (2009) 437-470.*
[7] *A. Ginting, M. Nouari, Int. J. Mach. Tools and Manuf. 49 (2009) 325-332.*
[8] *Z. Pala, Analýza stavu zbytkové napjatosti v povrchových vrstvách soustružených korozivzdorných ocelí, rešeršní práce, 21 s, prosinec 2011.*
[9] *M.C. Shaw, Ann. CIRP 33 (1984) 221.*
[10] *B.F. von Turkovich, Encycl. Mater. Sci. Eng. 1 (1986) 649.*