



**FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

Katedra technologie obrábění

Disertační práce

Studie problematiky frézování feriticko-martenzitické oceli P91

Autor: Ing. **Zdeněk Janda**
Školitel: Doc. Ing. **Jiří Česánek**, Ph. D.
Školitel specialista: Ing. **Jan Řehoř**, Ph.D.

Plzeň 2012

Garance a vedení disertační práce

Vedoucí katedry: Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
Vedoucí oddělení: Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
Školitel: Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.
Školitel specialista: Ing. Jan Řehoř, Ph.D.

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této disertační 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 disertační práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Mé díky patří především pánům školitelům, Doc.Ing. Jiřímu Česánkovi, Ph.D. a Ing. Janu Řehořovi, Ph.D., za cenné rady a připomínky po dobu mého studia a při řešení této práce. Také bych chtěl poděkovat panu Doc.Ing. Františku Zvonečkovi, Ph.D., který mi pomohl cennými radami zejména při řešení této práce.

Avšak největší díky patří slečně Ing. Jaroslavě Fulemové. Ta mi byla vždy oporou jak ve studiu a realizaci řešení této práce, tak také v osobním životě. Díky.

Anotace

Tak, jako z důvodu zvýšení energetické účinnosti, podobně i z hlediska snížení znečištění životního prostředí, je jednou z možností zvyšovat provozní teploty a tlaky pracovního média v elektrárnách až na teploty přesahující hodnoty 600°C při tlaku více než 25MPa. To s sebou přináší zvýšené nároky na konstrukční materiály těchto zařízení. Celý energetický průmysl se pomalu začíná přeorientovávat na práci s takovými konstrukčními materiály, které mají významně zlepšené užité vlastnosti právě za vysokých teplot. Vhodnou volbou jsou feriticko-martenzitické oceli. Mezi jejich výhody, v porovnání s běžně používanými austenitickými oceli zejména patří: výrazně lepší odolnost proti koroznímu praskání, vyšší tepelná vodivost a nižší koeficient tepelné roztažnosti. Jejich nasazení však s sebou přináší i jeden problém a to jejich zpracování. Právě vysoký obsah legujících prvků, který těmto materiálům zaručuje tolik žádané provozní vlastnosti značně zhoršuje jejich obrobitelnost.

Mezi tyto progresivní, avšak těžkoobrobitelné materiály patří také ocel EN ISO X12CrMoVNbN9-1 (ekv. ČSN 17 119, DIN 1.4903), pro kterou se vžil spíše obchodní označení P91.

Tato práce je zaměřena právě na oblast obrábění oceli P91. Hlavní pozornost je věnována experimentálnímu studiu a diagnostice řezného procesu. Stěžejním cílem práce je sledování a objasnění některých jevů, které doprovázejí proces obrábění, zejména s ohledem na vznikající povrch a splnění požadavků na něj kladených.

V úvodní, rešeršní části, jsou nejprve představeny korozivzdorné oceli, používané v energetickém průmyslu. Největší pozornost je věnována oceli P91. Určitá část je také věnována charakteristice obrobeného povrchu. Zejména je sledována vazba mezi opotřebením nástroje a stavem obrobeného povrchu. Vše se zaměřením na obrábění korozivzdorných ocelí.

Úkolem druhé části je, v závislosti na experimentálním studiu, popsat problematiku obrábění oceli P91 pro speciální aplikace v energetickém průmyslu – obrábění dělící roviny tělesa parní turbíny. Tato část je rozdělena na několik kapitol, kdy nejpodstatnější jsou dvě z nich, popisující obrábění ve fázi předdokončovacího a dokončovacího frézování.

Annotation

Increasing of service temperature and pressure of working medium in power station as far as on values higher than 600°C and more than 25 MPa causes an increasing of power efficiency and a decrease of heat pollution. It causes increased requirements to construction materials of this machinery. Whole power industry begins with reorientation on work with these construction materials, which have significantly improved usable properties under high temperatures. Acceptable choice are ferritic-martensitic steels. Among their benefits in comparison with common use austenitic steels) belong: markedly better corrosive cracking resistance, higher heat conductivity and lower coefficient of heat expansivity. But problem is with fabrication of them. Because of high content of alloying elements, which guarantee so much requested operational characteristics, considerably deteriorate their machinability.

Among these progressive but hard to machine materials belongs also steel EN ISO X12CrMoVNbN9-1 (ESN 17119, DIN 1.4903), which is known under trade name P91.

This thesis is aimed to area of machining of steel P91. Main attention is devoted to experimental study and diagnostic of cutting process. Main aim of this work is to monitoring and explanation of some effect which accompany the cutting process, especially in light of generation of surface and its quality requirements.

In the part of introduction, there are introduced stainless steels which are used in power industry. The biggest focus is given to steel P91. The specific part of this dissertation is also focused to characteristic of machined surface. Especially there is monitored the link between tool wear and the state of machined surface all of it with focus on machining of stainless steels.

The aim of the second part is to describe problems of machining steel P91, depending on experimental study, for special applications in power industry – machining of dividing plane of body steam turbine. This part of the dissertation is divided to several chapters, where the most important chapters are two of them, which are describing machining during semi-finishing and finishing cut.

Obsah

Anotace	3
Obsah	5
Seznam obrázků a tabulek.....	7
Seznam zkratk a symbolů.....	9
1 Úvod do korozivzdorných ocelí.....	12
1.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí.....	13
1.2 Oceli pro energetický průmysl a oceli žáruvzdorné.....	14
1.2.1 Ocel P91	14
1.2.2 Ocel P91 v energetickém průmyslu	17
1.2.3 Další vývoj žárupevných ocelí.....	18
2 Obrábění korozivzdorných ocelí.....	18
2.1 Pravidla a doporučení pro obrábění korozivzdorných ocelí	19
3 Integrita obrobeného povrchu	20
3.1 Jakost obrobeného povrchu.....	21
4 Parametry jakosti obrobeného povrchu.....	22
4.1 Drsnost obrobeného povrchu po obrábění	22
4.1.3 Vlivy řezného procesu na drsnost obrobeného povrchu	23
4.1.5 Vliv řezného prostředí a teploty na drsnost obrobeného povrchu	29
4.3 Zpevňování obrobeného povrchu.....	32
4.3.1 Mikrotvrdost obrobeného povrchu.....	33
5 Shrnutí poznatků a stanovení cílů disertační práce	35
5.1 Cíle disertační práce.....	36
6 Projekt vs. disertační práce	37
7 Charakteristika experimentálního studia.....	38
7.1 Experimentální vybavení	38
7.1.2 Nástroj.....	38
7.1.3 Řezné materiály.....	38
7.2 Experimentální obrobek.....	39
7.3 Experimentální záběrové podmínky	39
7.4 Pravidla pro měření sledovaných veličin	39
8 PŘEDDOKONČOVÁNÍ	40
8.1 PRE-EXPERIMENT.....	41
8.1.1 Experimentální podmínky.....	41
8.1.2 Trvanlivost řezného nástroje.....	41
8.1.3 Drsnost obrobeného povrchu	43
8.1.4 Kapilární defektoskopická zkouška na mikrotrhliny	43
8.1.5 Změna tvrdosti obrobeného povrchu	43
8.1.6 Závěr pre-experimentu v oblasti předdokončování	43
8.2 EXPERIMENT	43
8.2.1 Trvanlivost	44
8.2.2 Drsnost obrobeného povrchu	48
8.2.3 Celkové silové zatížení nástroje.....	51
8.2.4 Efektivní řezný výkon.....	53
8.2.5 Vliv řezných podmínek na velikost silového zatížení	55
8.2.6 Zpevnění obrobeného povrchu.....	58
8.3 Závěr fáze před-dokončovacího obrábění.....	60
9 DOKONČOVÁNÍ.....	62
9.1 PRE-EXPERIMENT.....	62
9.1.1 Experimentální podmínky.....	62

9.1.2	Trvanlivost řezného nástroje	63
9.1.3	Drsnost obrobeného povrchu	64
9.1.4	Efektivní řezný výkon	65
9.1.5	Další charakteristiky řezného procesu	66
9.1.6	Závěr pre-experimentu v oblasti dokončování.....	66
9.2	EXPERIMENT	66
9.2.1	IN2004	67
9.2.1.1	Trvanlivost – IN2004	67
9.2.1.2	Drsnost obrobeného povrchu a nosný podíl profilu– IN2004.....	70
9.2.1.3	Celkové silové zatížení – IN2004	71
9.2.1.4	Efektivní řezný výkon - IN2004	73
9.2.2	IN2010	74
9.2.2.1	Trvanlivost – IN2010	74
9.2.2.2	Drsnost obrobeného povrchu a nosný podíl profilu – IN2010.....	76
9.2.2.3	Celkové silové zatížení – IN2010	78
9.2.2.4	Efektivní řezný výkon – IN2010.....	79
9.2.3	IN0540	80
9.2.3.1	Trvanlivost – IN0540	80
9.2.3.2	Drsnost obrobeného povrchu a nosný podíl profilu – IN0540.....	82
9.2.3.3	Celkové silové zatížení – IN0540	83
9.2.3.4	Efektivní řezný výkon – IN0540.....	85
9.2.4	Celkové porovnání	86
9.2.4.1	Trvanlivost	86
9.2.4.2	Drsnost obrobeného povrchu a nosný podíl profilu.....	87
9.2.4.3	Celkové silové zatížení	88
9.2.4.4	Efektivní řezný výkon	89
9.2.4.5	Zpevnění obrobeného povrchu a plošná drsnost.....	90
9.3	Závěr fáze dokončovacího obrábění	92
10	Shrnutí výsledků	94
10.1	Diskuze výsledků	94
10.2	Přínos praxi a další řešení	97
11	Závěr	98
12	Literatura.....	101
	Přílohy k disertační práci.....	105

Seznam obrázků a tabulek

Obr.1-1 Vliv obsahu chromu v oceli na rychlost vytvoření pasivační vrstvy	12
Obr.1-3 Mikrostruktura oceli P91	15
Obr.1-4 Jednotlivé části parní turbíny	17
Obr.3-1 Šest skupin klíčových faktorů, které definují integritu obrobeného povrchu	21
Obr.4-2 Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu	22
Obr.4-3 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na řezné rychlosti	23
Obr.4-4 Závislost drsnosti povrchu na řezné rychlosti (a) a posuvu na zub (b) s použitím VBD s úhlem čela 28°	23
Obr.4-5 Závislost drsnosti povrchu na řezné rychlosti (a) a posuvu na zub (b) s použitím VBD s úhlem čela 17°	24
Obr.4-6 Struktura obrobeného povrchu VBD typu APCR při $v_c = 88$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/z	24
Obr.4-7 Struktura obrobeného povrchu VBD typu APCR při $v_c = 88$ m/min, $f_z = 0,06$ mm/z	24
Obr.4-8 Struktura obrobeného povrchu VBD typu APCR při $v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/z	25
Obr.4-9 Struktura obrobeného povrchu VBD typu APCT při $v_c = 88$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/z	25
Obr.4-10 Struktura obrobeného povrchu VBD typu APCT při $v_c = 88$ m/min, $f_z = 0,06$ mm/z	25
Obr.4-11 Struktura obrobeného povrchu VBD typu APCT při $v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,07$ mm/z	26
Obr.4-12 Vliv posuvu a hloubky řezu na drsnost obrobeného povrchu	26
Obr.4-13 Stopy po frézování oceli 12050.1 a 14 240	26
Obr.4-14 Vliv povlaku nástroje na drsnost obrobeného povrchu	27
Obr.4-15 Hodnota drsnosti obrobeného povrchu pro různé řezné materiály	27
Obr.4-16 Teoretická mikrogeometrie řezného břitu	28
Obr.4-17 Drsnost obrobeného povrchu v závislosti na opotřebení nástroje a různých řezných podmínkách	29
Obr.4-18 Rozložení opotřebení nástroje v závislosti na úhlu nastavení ostří κ_r	29
Obr.4-22 Vliv řezné rychlosti, prostředí a opotřebení nástroje na drsnost obrobeného povrchu	30
Obr.4-23 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na objemu odebraného materiálu pro různá řezná prostředí	31
Obr.4-25 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na řezných podmínkách	31
Obr.4-26 Oblasti plastických deformací v řezu	32
Obr.4-27 Vliv zaoblení ostří na obrobený povrch	32
Obr.4-28 Vznik zpevněné povrchové vrstvy v důsledku reálného ostří	33
Obr.4-29 Mikrostruktura martenzitické oceli před (a) a po obrobení (b)	34
Obr.4-30 Mikrotrvdost obrobeného povrchu pro záplavové (a) a suché (b) obrábění	34
Obr.4-31 Vliv velikosti poloměru zaoblení ostří na zpevnění obrobeného povrchu	35
Obr.5-1 Model vnitřního tělesa parní turbíny	36
Obr.6-1 Frézování dělicí roviny tělesa parní turbíny a frézovací hlava Ingersoll, $\varnothing 315$ mm	37
Obr.7-1 Nástroj pro předdokončování (A) a dokončování (B)	38
Obr.7-2 Typy použitých tvarů VBD pro předdokončování (A) a dokončování (B)	38
Obr.7-10 Schéma záběrových podmínek	39
Obr.7-11 Umístění náměrných oblastí na obrobku	40
Obr.8-1 Porovnání trvanlivosti jednotlivých řezných materiálů	42
Obr.8-2 Vztah trvanlivosti T a poloměru zaoblení ostří r_N pro testované řezné materiály	42
Obr.8-3 Vliv poloměru zaoblení ostří na trvanlivost nástroje	43
Obr.8-4 Závislost opotřebení nástroje na objemu odebraného materiálu a v_c ; $f_z = 0,15$ mm; IN2004 a IN2005	45
Obr.8-5 Vliv obsahu WC a Co na vlastnosti slinutého karbidu	46
Obr.8-6 Vliv obsahu Co a zrnitosti na tvrdost slinutého karbidu	46
Obr.8-7 Závislost opotřebení nástroje na objemu odebraného materiálu a f_z ; $v_c = 140$ m/min; IN2004 a IN2005	47
Obr.8-8 Hřbet VBD IN2004 (vlevo) a čelo VBD IN2005	48
Obr.8-9 Poškození VBD typu IN2005	48
Obr.8-10 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na V a změně v_c ; $f_z = 0,15$ mm; IN2004 a IN2005	50
Obr.8-11 Porovnání obrobených povrchů pro IN2004 a IN2005 při různé řezné rychlosti; $f_z = 0,15$ mm/zub	51
Obr.8-12 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na V a změně f_z ; $v_c = 140$ m/min; IN2004 a IN2005	51
Obr.8-13 Závislost celkového silového zatížení F na V a změně v_c ; $f_z = 0,15$ mm; IN2004 a IN2005	52
Obr.8-14 Závislost celkového silového zatížení F na V a změně f_z ; $v_c = 140$ m/min; IN2004 a IN2005	53
Obr.8-15 Spotřeba energie vs. výrobní náklady	53
Obr.8-16 Efektivní řezný výkon v závislosti na V a změně řezné rychlosti v_c ; $f_z = 0,15$ mm; IN2004 a IN2005	54
Obr.8-17 Efektivní řezný výkon v závislosti na V a změně posuvu f_z ; $v_c = 140$ mm; IN2004 a IN2005	54
Obr.8-19 Závislost celkového silového zatížení F na v_c a V pro IN2004; $f_z = 0,15$ mm	56
Obr.8-20 Závislost celkového silového zatížení F na v_c a V pro IN2005; $f_z = 0,15$ mm	56
Obr.8-21 Závislost celkového silového zatížení F na f_z a V pro IN2004; $v_c = 140$ m/min	57
Obr.8-22 Závislost celkového silového zatížení F na f_z a V pro IN2005; $v_c = 140$ m/min	58
Obr.8-27 Vliv řezných podmínek na trvanlivost a V pro IN2004 a IN2005	60
Obr.9-1 Porovnání trvanlivosti jednotlivých řezných materiálů: slinuté karbidy a cermety	63

Obr.9-2 Porovnání dosažené drsnosti obrobeného povrchu Ra v závislosti na V a v_C ; pro slinuté karbidy	64
Obr.9-3 Porovnání hladicí VBD a VBD běžné konstrukce	65
Obr.9-4 Porovnání dosažené drsnosti obrobeného povrchu Ra v závislosti na V a v_C ; pro cermety	65
Obr.9-5 Opotřebenění nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na v_C a V; $f_Z = 4,5$ mm; IN2004	68
Obr.9-6 T- v_C závislost pro IN2004 ; $f_Z = 4,5$ mm; $VB_{KRIT} = 80$ μ m a T- v_C závislost pro RO	69
Obr.9-7 Opotřebenění nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na f_Z a V; $v_C = 270$ m/min; IN2004	69
Obr.9-8 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na V při změně v_C (vlevo) a f_Z (vpravo); IN2004	70
Obr.9-9 Kontakt dvou těles při rozdílné drsnosti	70
Obr.9-10 Porovnání podílu nosného profilu a jeho kritické části v závislosti na v_C a V; $f_Z = 4,5$ mm; IN2004	71
Obr.9-11 Porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části v závislosti na f_Z ; $v_C = 270$ m/min, IN2004	71
Obr.9-12 Závislost celkového silového zatížení F na v_C a V pro IN2004; $f_Z = 4,5$ mm	72
Obr.9-13 Závislost celkového silového zatížení F na f_Z a V pro IN2004; $v_C = 270$ m/min	73
Obr.9-14 Efektivní řezný výkon v závislosti na V, změně v_C (vlevo) a f_Z (vpravo); IN2004	74
Obr.9-15 Opotřebenění nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na v_C a V; $f_Z = 4,5$ mm; IN2010	75
Obr.9-16 T- v_C závislost pro IN2010; $f_Z = 4,5$ mm; $VB_{KRIT} = 80$ μ m	75
Obr.9-17 Opotřebenění nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na f_Z a V; $v_C = 200$ m/min; IN2010	76
Obr.9-18 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na V při změně v_C (vlevo) a posuvu f_Z (vpravo); IN2010	77
Obr.9-19 Porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části v závislosti na v_C ; $f_Z = 4,5$ mm, IN2010	77
Obr.9-20 Porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části v závislosti na f_Z ; $v_C = 200$ m/min, IN2010	78
Obr.9-21 Závislost celkového silového zatížení F na v_C a V pro IN2010; $f_Z = 4,5$ mm	78
Obr.9-22 Závislost celkového silového zatížení F na f_Z a V pro IN2010; $v_C = 200$ m/min	79
Obr.9-23 Efektivní řezný výkon v závislosti na V, v_C (vlevo) a f_Z (vpravo); IN2010	80
Obr.9-24 Opotřebenění nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na v_C a V; $f_Z = 4,5$ mm; IN0540	81
Obr.9-25 T- v_C závislost pro IN0540; $f_Z = 4,5$ mm; $VB_{KRIT} = 160$ μ m	81
Obr.9-26 Opotřebenění nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na f_Z a V; $v_C = 150$ m/min; IN0540	82
Obr.9-27 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na V při změně v_C (vlevo) a f_Z (vpravo); IN0540	82
Obr.9-28 Porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části v závislosti na v_C ; $f_Z = 4,5$ mm, $V = 6$ cm ³ ; IN0540 ..	83
Obr.9-29 Porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části v závislosti na f_Z ; $v_C = 150$ m, $V = 6$ cm ³ ; IN0540	83
Obr.9-30 Závislost celkového silového zatížení F na v_C a V pro IN0540; $f_Z = 4,5$ mm	84
Obr.9-31 Závislost celkového silového zatížení F na f_Z a V pro IN0540; $v_C = 150$ m/min	85
Obr.9-32 Efektivní řezný výkon v závislosti na V, v_C (vlevo) a f_Z (vpravo); IN0540	86
Obr.9-33 Porovnání závislostí opotřebenění nástroje VBn na V pro jednotlivé karbidy	87
Obr.9-34 Porovnání závislostí opotřebenění nástroje KB na V pro jednotlivé karbidy	87
Obr.9-35 Porovnání závislostí drsnosti obrobeného povrchu Ra na V pro jednotlivé karbidy	88
Obr.9-36 Porovnání nosného podílu profilu a kritické části v závislosti na ŘM; $v_C = 150$ m/min; $f_Z = 4,5$ mm	88
Obr.9-37 Porovnání nosného podílu profilu a kritické části v závislosti na ŘM; $v_C = 226$ m/min; $f_Z = 4,5$ mm	88
Obr.9-38 Porovnání závislostí celkového silového zatížení F na V pro jednotlivé karbidy	89
Obr.9-39 Porovnání závislostí efektivního řezného výkonu na V pro jednotlivé karbidy	90
Obr.9-40 Vliv řezných podmínek na produktivitu obrábění pro jednotlivé ŘM	93
Obr.10-1 Vliv povlaku na životnost nástroje při vrtání chrom-molybdenové oceli	95
Obr.10-2 Vliv řezné rychlosti na drsnost obrobeného povrchu	96
Obr.10-3 Vliv posuvu a hloubky řezu na drsnost povrchu a vliv hloubky řezu na velikost řezného odporu	96
Obr.10-4 Ověřování doporučených podmínek na reálném tělese v podniku ŠKODA POWER s.r.o	98
Obr.11-1 Předpokládaná spotřeba elektrické energie a její zdroje a předpoklad spotřeby el.energie v ČR do r. 2050 ...	99
Obr.11-2 Srovnání jednotlivých primárních zdrojů el.energie z hlediska měrné ceny energie	99
Tab.8-4 Vliv vzrůstajícího obsahu Co na vlastnosti slinutého karbidu	46
Tab.8-6 Hodnocení dosažených výsledků	61
Tab.9-1 Zvolené řezné podmínky pre-experimentu – pro SK a cermety	63
Tab.9-2 Řezné podmínky experimentu	66
Tab.9-3 Řezné podmínky pro jednotlivé řezné materiály	67
Tab.9-7 Hodnocení dosažených výsledků z hlediska kvality i kvantity	94
Tab.9-4 Kombinace řezných podmínek při sledování zpevnění obrobeného povrchu	90
Tab.9-5 Porovnání zpevnění obrobeného povrchu po dokončování za vybraných podmínek	91
Tab.9-6 Porovnání obrobených povrchů po dokončování za vybraných podmínek	92

Seznam zkratk a symbolů

Zkratka	Popis
Al	Hliník
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
AlTiN	Otěruvzdorný povlak nástroje
APCR	Označení VBD
APCT	Označení VBD
ARA	Anizotermický rozpad austenitu
C	Uhlík
CBN	Cubic bore nitride – Kubický nitrid bóru
CNC	Computer numerical control – počítačový řídicí systém
Co	Kobalt
Cr	Chrom
CrN	Nitrid chromu
CVD	Chemical Vapour Deposition – chemické nanášení tenkých vrstev
ČSN	Česká státní norma
E911	Obchodní označení typu oceli
Fe	Železo
HRC	Tvrdost dle Rockwella
HSC	High speed cutting – Vysokorychlostní obrábění
HV	Tvrdost dle Vickerse
IN2004 atd	Obchodní označení žezného materiálu
ISO	International standard organization - Mezinárodní org. pro normalizaci
KMM	Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
KTO	Katedra technologie obrábění
Mn	Mangan
Mo	Molybden
MLQ	Minimum quantity lubrication – Minimální množství kapaliny
N	Dusík
Nb	Niob
NC	Numerical control – Číslicové řízení
Nf616	Obchodní označení typu oceli
Ni	Nikl
P	Fosfor
PH	Preheated - předehřátý
PKD	Polykristalický diamant
PVD	Physical Vapour Deposition – Fyzikální nanášení tenkých vrstev
P91(T91)	Obchodní označení oceli EN ISO X12CrMoVNbN9-1
P92	Obchodní označení typu oceli
RO	Rychlořezná ocel
RT	Room temperature – při pokojové teplotě
ŘK	Řezná keramika
S	Síra
Si	Křemík
Si ₃ N ₄	Nitrid křemičitý
SK	Slinutý karbid
Sn	Cín
S-N-O	Stroj – nástroj - obrobek
SW	Software

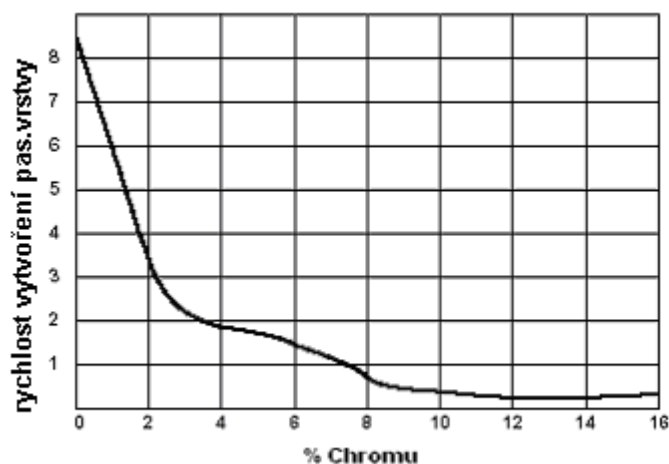
Ti	Titan
TiAlN	Otěruvzdorný povlak nástroje
TiAlSiN	Otěruvzdorný povlak nástroje
TiCN	Otěruvzdorný povlak nástroje
TiN	Otěruvzdorný povlak nástroje
TO vrstva	Tenká otěruvzdorná vrstva
V	Vanad
VBD	Vyměnitelná břitová destička
W	Wolfram
WC	Karbid wolframu
ZČU	Západočeská univerzita
Zn	Zinek
Zr	Zirkonium
2D	Two dimension – dvou rozměrný (obraz)
3D	Three dimension – tří rozměrný (obraz)

Symbol	Popis	Jednotka
α_o	úhel hřbetu v nástr. rovině ortogonální	°
β_o	úhel břitu v nástr. rovině ortogonální	°
γ_o	úhel čela v nástr. rovině ortogonální	°
δ_o	úhel řezu v nástr. rovině ortogonální	°
κ_r	úhel nastavení ostří	°
λ_s	úhel sklonu ostří	°
A	tažnost materiálu	%
a_e	šířka řezu	mm
a_p	hloubka řezu	mm
c_F	konstanta funkce	--
c_{VT}	materiálová konstanta	--
E	Youngův modul	GPa
F	celkové zatížení nástroje	N
F_x	složka řezné síly ve směru X	N
F_y	složka řezné síly ve směru Y	N
F_z	složka řezné síly ve směru Z	N
f_z	posuv na zub	mm
H_{CH}	hybnost třísky	$g \cdot ms^{-1}$
h_D	tloušťka odřezávané vrstvy	mm
KT	šířka opotřebení na čele nástroje	μm
KV	hodnocení vrubové houževnatosti (práce)	J
l	dráha nástroje	mm
m_{CH}	hmotnost třísky	g
n_F, y_F	exponenty funkce	--
Q	teplo řezného procesu	J
Ra, Rz, Rt, ...	parametr hodnocení drsnosti obrobeného povrchu	μm
r_N	poloměr zaoblení ostří	μm
R_m	mez pevnosti	Mpa
$R_{p0,2}$	mez kluzu	MPa
T	trvanlivost	min
t	čas	min; s
V	objem odebraného materiálu	cm^3
VB	velikost opotřebení na hřbetě nástroje	μm
VBmax	maximální hodnota opotřebení na hřbetě	μm
v_c	řezná rychlost	m/min
v_{CH}	rychlost odchodu třísky	m/s
v_f	posuvová rychlost	mm/min
Z	zúžení materiálu (kontrakce)	%

1 Úvod do korozivzdorných ocelí [3,16,17, 18,19,20]

Jen málo kovů je dnes v průmyslu a vůbec ve všech oblastech lidské činnosti používáno v čisté formě. Valná většina těchto materiálů obsahuje mimo základního kovu také řadu legujících prvků. Tyto legující prvky jsou přidávány z důvodu změny, v kladném významu, základních vlastností těchto kovů. Korozivzdorné oceli jsou slitiny na bázi železa. Přidání druhého prvku (kterým je v tomto případě chrom) do železa, dochází k výrazné změně korozivzdorných vlastností. Korozivzdorné oceli jsou tedy slitiny, které obsahují alespoň 12% chromu.

Při překročení obsahu 12% narůstá u ocelí legovaných chromem skokem odolnost proti mnoha agresivním mediím – tzv. mez rezistence. Při této hladině se totiž na povrchu materiálu, za přítomnosti kyslíku, začíná okamžitě tvořit extrémně tenká a průhledná vrstva (povlak) viz *obr.1-1*. Tato vrstva zabraňuje šíření atomů kyslíku dále do železa a tím chrání ocel proti korozi. Tento stav se nazývá pasivace a materiál v pasivním stavu je vysoce korozivzdorný. Samotná oxido-chromová pasivační vrstva je velmi stabilní a chrání ocel jak v atmosférickém prostředí, tak i v prostředích na bázi vody. Tato ochrana může být ještě zlepšena zvýšením obsahu chromu, niklu, molybdenu a/nebo dalšími legujícími prvky. Chrom zlepšuje stabilitu ochranného filmu, molybden a chrom dohromady zvyšují odolnost proti chloridům a nikl zvyšuje odolnost pasivační vrstvy v kyselých prostředích. Do základní Fe-Cr matrice může být dále přidáno několik dalších legujících prvků, které mohou vytvořit přes 150 různých stupňů složení, každý s jedinečnými vlastnostmi. Tato rozsáhlá skupina korozivzdorných ocelí může být rozdělena do pěti základních kategorií (viz *kap. 1.1*)



Obr.1-1 Vliv obsahu chromu v oceli na rychlost vytvoření pasivační vrstvy [20]

V situaci, kdy je ochranná (pasivační) vrstva narušena, nebo dokonce zničena, tak v případě přítomnosti kyslíku v okolním prostředí dojde k její okamžité obnově a tím i k zachování maximální ochrany.

Většina korozivzdorných ocelí obsahuje značné množství dalších legujících prvků. Obecně se tím sleduje změna struktury, zlepšení odolnosti proti korozi a dalších vlastností, v neposlední řadě rovněž dosažení vyšší pevnosti oceli. Pevnost se dá navíc výrazně zvýšit kalením, podobně jako u uhlíkových ocelí. Podmínkou je v tomto případě ale dostatečný obsah uhlíku.

Jak je z následujícího rozdělení patrné, nejvíce korozivzdorných ocelí se díky jejich vlastnostem v dnešní době používá právě v energetickém průmyslu. Rozbor spotřeby korozivzdorných ocelí:

- 50 % chemický a energetický průmysl;
- 25 % potravinářský průmysl (včetně kuchyňských zařízení);
- 5 % automobilový průmysl;
- 10 % domácí elektrické spotřebiče;
- 10 % architektura.

A právě z důvodu následného použití korozivzdorných ocelí je také důležité zaměřit se pečlivě na jejich správnou volbu. Materiálovou a korozní analýzou technologických zařízení vyrobených

z dražších korozivzdorných ocelí lze dosáhnout snížení počtu oprav a odstávek, zvýšení kvality inspekce a rizik provozu energetických zařízení. Většinou se ukazuje, že cenově dražší optimálně zvolená korozivzdorná ocel použitá na patřičných místech je vysoce ekonomická v porovnání s ostatními levnějšími konstrukčními materiály.

Při volbě korozivzdorné oceli je proto třeba:

- charakterizovat provozní média a technologické parametry výroby;
- stanovit korozní podmínky a pravděpodobnost vzniku možných korozních pochodů;
- vyhodnotit změny provozních podmínek na korozní odolnost;
- vzít v úvahu mechanické a fyzikální vlastnosti korozivzdorné oceli;
- posoudit strukturní stabilitu ocelí při dlouhodobém provozu;
- zabývat se technologickými vlastnostmi ocelí při výrobě a montáži zařízení;
- vyhodnotit sortiment, dostupnost a cenu;
- stanovit přípustnost korozního napadení ocelí, životnost zařízení a bezpečnost.

1.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí

Podle chemického složení se korozivzdorné oceli dělí na tři základní skupiny:

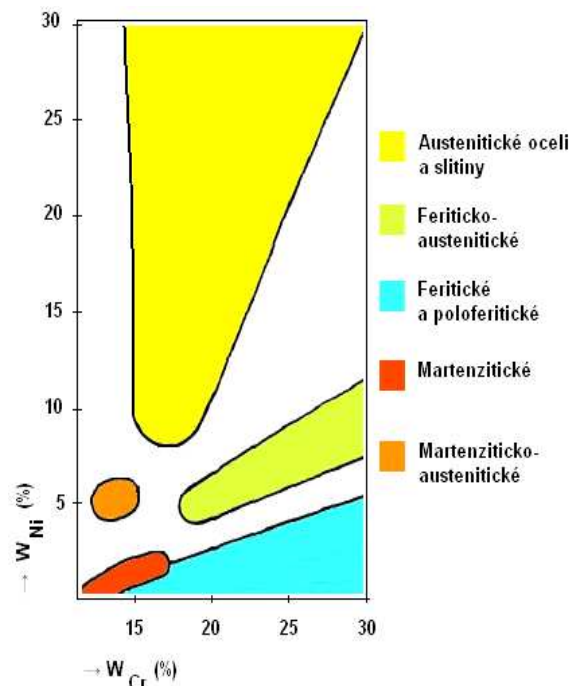
- Cr korozivzdorné oceli
- CrNi oceli
- CrMn oceli

V závislosti na struktuře oceli se korozivzdorné oceli dělí do tří základních skupin:

- martenzitické,
- feritické,
- austenitické,

Toto základní rozdělení se však běžně rozšiřuje celkově na pět základních skupin, kdy jsou výše uvedené skupiny ještě navíc rozšířeny o další dvě skupiny ocelí, u kterých není jejich zařazení tak úplně jednoznačné, neboť v sobě kombinují již zmiňované základní struktury, nebo jejich vlastnosti. Další dvě skupiny ocelí jsou tedy:

- dvoufázové (duplexní)
 - austeniticko-feritické,
 - martenziticko-feritické,
 - martenziticko-austenitické.
- precipitačně vytvrditelné
 - martenzitické,
 - austenitické.



Obr.1-2 Typy korozivzdorných ocelí podle chemického složení [3]

Jak již bylo uvedeno, hlavním legujícím prvkem u korozivzdorných ocelí je chrom. Ten vytváří ferit a nemění feritickou strukturu. Základní korozivzdorné chromové oceli tedy dosahují vlastností, které se značně přibližují vlastnostem čistého železa. Dalším legujícím prvkem je nikl, který má také podstatný vliv na vlastnosti a strukturu ocelí. Stabilizuje materiál a podporuje jeho kalitelnost. Vlivem dostatečně vysokého podílu niklu vzniká u korozivzdorných ocelí austenitická struktura, čímž dochází k značným změnám mechanických vlastností. V tomto stavu je ocel nemagnetická. Molybden je další legující prvek, který má na strukturu stejný účinek jako chrom a všeobecně zvyšuje pevnost a odolnost proti korozi. Tyto oceli jsou často odolné také proti

kyselinám. Dusík značně zvyšuje pevnost austenitických ocelí a stejným způsobem jako nikl ovlivňuje strukturu. Měď zlepšuje odolnost proti korozi v určitých kyselinách. Titan a niob na sebe vážou uhlík a tím působí stabilizačně. Dále se mohou jako legující prvky použít také mangan, hliník a křemík.

1.2 Oceli pro energetický průmysl a oceli žáruvzdorné [3,13, 14, 15, 16]

Jelikož pracovní parametry páry, která je nejčastějším pracovním médiem v elektrárnách, jsou velmi vysoké: tlak páry 32-35 MPa, teplota 650 °C, jsou i na konstrukční materiály kladeny značné nároky. Níže jsou v krátkosti uvedeny dnes nejčastěji používané oceli pro energetická zařízení.

Oceli: 9Cr-1Mo-Nb-V, 9Cr-2Mo, klasické 12Cr oceli

Korozivzdorné oceli – nízkolegované Cr, CrMo, V ve stavu tepelného zpracování:

- normalizačně žíhané + popuštěné \Rightarrow karbidické reakce
- zušlechtnuté – kalené + popuštěné \Rightarrow martenziticky popuštěné

Požadavky na oceli:

- zaručená prokalitelnost oceli
- zpevnění martenzitickou přeměnou
- kalitelnost oceli – potřebná rychlost ochlazení z austenitické teploty pro získání plně martenzitické struktury.

Slitinové prvky zpomalují transformaci A – M (transformační zpevnění) a snižují reakční rychlosti – precipitace karbidu.

Tyto materiály patří do širší skupiny ocelí, které jsou nazývány oceli pro zvýšené teploty, neboli oceli žáruvzdorné. Tato skupina je charakterizována následovně:

- nízkolegované oceli pro zvýšené teploty

skupina ocelí – Cr oceli, Cr-Mo oceli, Cr-Mo-V oceli

- zvýšené T nad 450 °C – průběh termálně aktivovaných procesů, rezultujících do „creepu“.

Oceli odolné vůči „creepu“ (tečení) – konstrukční materiály pro kotlové systémy elektráren na konstrukci kotlových těles, trubkových systémů (vysokotlaké trubky), rotory turbín, přehříváky a jiných vysoce namáhaných součástí.

Složení: Cr – 0,5 – 9(12%)

Mo – 0,5 – 1%

C < 0,20%

1.2.1 Ocel P91 [2,4,8,9,10,11,12,54,56]

Pro části energetických zařízení používané v „creepové“ oblasti jsou klíčovými užitnými vlastnostmi odolnost proti tečení a odolnost proti vysokoteplotní korozi (oxidaci) v prostředí vodní páry. V průmyslově vyspělých zemích (zejména USA, Japonsko, země EU, ale i Indie a Čína) se věnuje velká pozornost vývoji a technologickému osvojení nových značek martenzitických ocelí na bázi (9-12) %Cr, modifikovaných dalšími prvky (Mo, W, Co, N, B, V). Do této skupiny ocelí patří také ocel X12CrMoVNb9-1 [8]. Tato ocel je dnes nejznámější pod obchodním označením P91 (9%Cr - 1%Mo). Jedná se o modifikovanou feriticko-martenzitickou ocel mikrolegovanou vanadem, niobem a dále kontrolovaným obsahem dusíku. Český ekvivalent této oceli má označení dle ČSN 17 119, a patří mezi představitele moderních žárovevných ocelí na bázi 9% Cr, která vznikla modifikací starší varianty oceli ČSN 17 116, lišící se přísadou legur vanadu a niobu.

Mikrostruktura

Mikrostruktura odlitku je tvořena popuštěným martenzitem s delta feritem objemově maximálně do 1% (příznivý vliv na žáropevnost oceli). Přípustná střední velikost zrna se připouští do 100 μm .

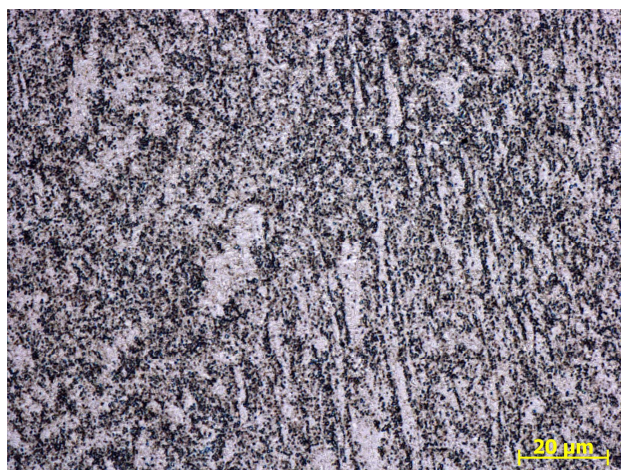
Mikrostruktura a precipitační reakce v této oceli jsou ovlivněny chemickým složením a parametry tepelného zpracování. Daleko lepší pevnost při tečení než u běžnějších ocelí je důsledek optimalizovaného chemického složení v kombinaci s vhodným tepelným zpracováním.

Mezi nejdůležitější mikrostrukturní procesy patří snižování celkové plochy hranic zrn, pokles hustoty dislokací, rozpouštění metastabilních a precipitace stabilních minoritních fází. Důležitou úlohu ve vývoji mikrostruktury modifikovaných chromových ocelí hrají karbidy typu M_{23}C_6 , které tvoří majoritní podíl částic minoritních fází.

Vysoká úroveň odolnosti modifikovaných chromových ocelí vůči tečení je často spojována s precipitací jemných částic sekundární fáze. Prvky V, Nb a N v oceli způsobují vysrážení MX částic, kde M se skládá z V nebo Nb a X se skládá z N nebo C. Jedná se prakticky o čisté nitridy, a proto objemový podíl částic této fáze je závislý na obsahu dusíku v tuhém roztoku. Částice MX mohou být v mikrostruktuře přítomny po tepelném zpracování. V závislosti na obsahu molybdenu a nebo wolframu v (9-12)% Cr ocelích může v průběhu žhání precipitovat Lavesova fáze. Vylučování těsně uspořádaných částic Lavesovy fáze probíhá již při obsahu 0,6 hm. % Mo v oceli.

LAVESOVY FÁZE

- intermediální fáze – obecně typu AB_2
- vznikají mezi prvky s největšími rozdíly v atomových poloměrech a vznikají mezi prvky rozmístěnými v různých částech periodického systému.
- Podmínka: zachování poměru atomových poloměrů $r_A : r_B$ v mezích 1,9 – 1,34.
- Výskyt: vysokochromové ocele s vyšším obsahem W nebo Mo (Fe_2W , Fe_2Mo)
- V systémech Fe-Cr-W-Mo-C budou do přítomné Lavesovy fáze přecházet jak atomy W, Mo tak i Cr ... tj. vzorec $\Rightarrow (\text{Fe}, \text{Cr})_2 (\text{W}, \text{Mo})$



Obr.1-3 Mikrostruktura oceli P91

Předpokládá se, že základ vysoké odolnosti proti tečení tvoří tyto aspekty:

- martenzitická mikrostruktura
- částice karbidů a nitridů ve spojení s hustou dislokační strukturou
- Lavesovy fáze

Martenzitická struktura je velmi stabilní. Precipitační reakce během tepelného zpracování má významný vliv na pevnost materiálu při tečení. Při ní vznikají velice jemné částice karbidů, karbonitridů, respektive nitridů v matici tuhého roztoku. Srážení částic probíhá na hranicích zrn, subzrn a uvnitř subzrn. Precipitační zpevnění je uskutečňováno prostřednictvím interakcí mezi

dislokacemi a částicemi precipitátů, které brzdí kinetiku procesů zotavení a rekrystalizace kovové matrice. Precipitační zpevnění závisí na rozměrové a termodynamické stabilitě jednotlivých minoritních fází. Hrubnutí karbidů vede k rozpouštění malých a růstu velkých částic, což vede ke snížení počtu částic a zvětšování středního průměru částic. Tím dochází ke zvětšování vzájemné vzdálenosti částic a poklesu precipitačního zpevnění.

V případě substitučního zpevnění se jedná o optimální legování oceli rozptylovými atomy Mo, které účinně brání dislokačnímu pohybu. Na zpevnění tuhého roztoku se podílí jen ta část Mo v oceli, která není vázána ve formě sekundárních fází. Proto není účelné zvyšovat obsah Mo v oceli nad mez rozpustnosti při pracovní teplotě.

Dalším typem je substrukturní zpevnění stabilizované karbidickými částicemi. Důležitou podmínkou pro dosažení vysoké úrovně žárupevnosti je, aby změny dislokační substrukтуры probíhaly co nejpomaleji. Původní martenzitické laťky jsou postupně nahrazovány subzrny, která postupně rostou. Na stabilizaci hranic subzrn, která rostou mnohem pomaleji než v čistých kovech, mají výrazný vliv částice precipitátů.

Chemické složení

Ocel P91 je typu CrMoVNbN s poměrně nízkým obsahem uhlíku. Z chemického složení vyplývá, že ocel má martenzitickou strukturu v širokém rozsahu ochlazovacích rychlostí s tvrdostí pouze max. 260 HB. Tvoří přechod mezi nízkolegovanými CrMo nebo CrMoV oceli a austenitickými korozivzdornými oceli. Je patrné, že na rozdíl od CrMo ocelí přibyly prvky V, Nb a N. Silně karbidotvorné prvky V a Nb tvoří s C a N karbonitridy, které jsou jemně dispergované v celém objemu. Tyto karbonitridy jsou dlouhodobě velmi stálé i za maximálních provozních teplot oceli a jsou hlavní zárukou udržení vysoké odolnosti proti creepu po celou dobu životnosti.

Přesné označení oceli dle ČSN je 17 119 a dle EN ISO je X12CrMoVNbN9-1. Z obou těchto značení je do určité míry čitelný výskyt prvků v ní obsažených:

Prvek	Min. [%]	Max. [%]
C	0,1	0,14
Cr	8	9,5
Mo	0,85	1,05
Mn	0,3	0,6
V	0,18	0,25
Nb	0,06	0,1
Si	0,2	0,5
Ni	-	0,4
N	0,03	0,07
Al	-	0,02
P	-	0,02
S	-	0,01

Tab. 2. Chemické složení

Výroba

Ocel je vyráběna ve vakuu při použití vakuové uhlíkové dezoxidace. Výrobu v obloukové elektrické peci bez použití tohoto procesu musí v jednotlivých případech schválit objednavatel.

Tepelné zpracování

Ocel P91 se používá zásadně v zušlechťeném stavu a po žhání na odstranění vnitřního pnutí po každé opravě vad a hrubování. V tomto stavu má tato ocel optimální vlastnosti pro práci za vysoké i pokojové teploty, hodnocené např. zkouškou vrubové houževnatosti. Zušlechťování

přibližně (pro orientaci) sestává z rozpouštěcího žhání při 1050°C, ochlazování na vzduchu a následného popouštění při žhací teplotě odlitku min. 740°C.

Vysoký obsah chromu a přítomnost dalších legujících prvků v modifikovaných chromových ocelích vyvolává posun křivek rozpadu austenitu v ARA diagramech k dlouhým časům. Důsledkem je, že tyto oceli jsou plně prokalitelné i v tlustých průřezích při ochlazování na vzduchu. Z tohoto vyplývá, že v širokém rozmezí ochlazovacích rychlostí vzniká martenzit. Ten je převážně latkový a uvnitř původních austenitických zrn vzniká několik svazků rovnoběžných martenzitických látek, které mohou být odděleny filmy zbytkového austenitu.

Mechanické vlastnosti

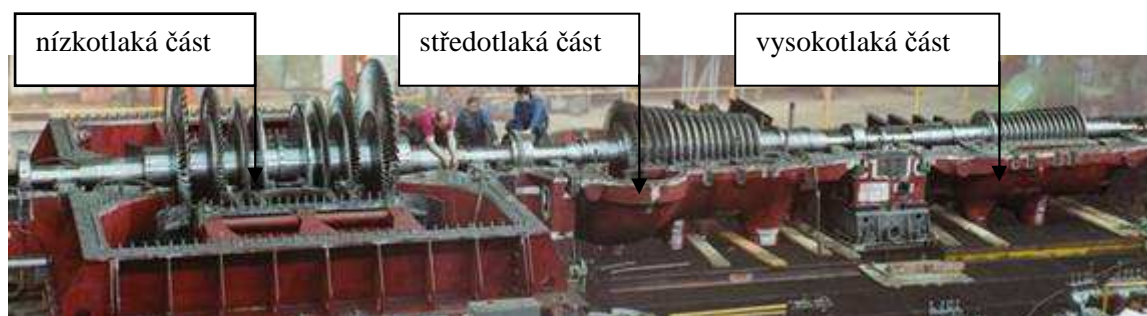
Teplota oceli [°C]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]	Kontrakce Z [%]
20	528	681	30	69
100	476	621	23	73
200	446	578	21	73
300	433	556	21	71
400	416	527	21	68
500	385	455	24	75
600	310	330	30	89
700	178	192	41	96

Tab. 3. Hodnoty mechanických vlastností

Nárazová práce při zkoušce vrubové houževnatosti je $KV = 41$ J. Požadovaná mez kluzu při teplotě 550°C je $R_{p0,2 \min} = 270$ MPa.

1.2.2 Ocel P91 v energetickém průmyslu

Tato ocel je určena pro výrobu výkovků, odlitků, plechů a trubek, jejichž aplikace se předpokládá při teplotách 550 - 650°C, tedy zejména pro energetiku a petrochemický průmysl. Litá forma této oceli je určena pro odlitky těles parních turbín, pracujících v oblasti páry do teploty 600°C. Ocel vznikla především za účelem zvyšování účinnosti tepelných elektráren, které stále představují hlavní zdroj elektrické energie, z ekonomických důvodů a požadavků na snižování množství exhalace škodlivých emisí. Toho lze dosáhnout zvyšováním parametrů páry, tj. teploty a tlaku páry, na vstupu do parních turbín ze současných 540°C/18MPa až na superkritických 610°C/30MPa. Očekává se totiž, že u zařízení pracujících za podmínek teploty páry kolem 600°C a tlaku přes 26 MPa stoupne účinnost až o 8% a emise oxidu uhličitého poklesnou přibližně o 20%. Pro výrobu zařízení pracujících v těchto podmínkách se průběžně vyvíjejí progresivní oceli odolné vůči tečení a korozi jako je tato.



Obr.1-4 Jednotlivé části parní turbíny [11]

Některá energetická zařízení pracují v cyklických režimech, čímž vzniká nebezpečí pozdějšího poškození vlivem tepelné únavy. Také v tomto případě mohou tyto vysocepevné oceli, jakou je právě P91, nabídnout další výhodu tím, že umožní snížení tloušťky průřezu součástí. Tím se výrazně zvýší ohebnost potrubí a sníží úroveň teplotního gradientu v silnostěnných součástech. Proto jsou v dnešní době tyto materiály používány nejen k výrobě nových zařízení, ale také k náhradě některých komponent v již existujících elektrárnách, obzvláště když elektrárna přechází ze základního k cyklickému provozu.

Mezi kladné vlastnosti materiálu patří zejména: vysoká žárupevnost a nízká plasticita při tepelném namáhání (creep), vysoký součinitel útlumu kmitů, zvýšená korozní odolnost v prostředí vodíku, vodní páry a zplodin hoření, vysoká tepelná vodivost, nízká teplotní roztažnost (oproti austenitickým ocelím), relativně nízká cena v porovnání s materiály používanými v energetickém průmyslu. A v neposlední řadě i dobré technologické vlastnosti vč. svařitelnosti. Z hlediska posledně zmiňované svařitelnosti je také vhodné uvést, že jako v případě dalších feriticko-martenzitických ocelí, je pevnost při tečení svaru menší než u základního materiálu.

1.2.3 Další vývoj žárupevných ocelí

Současný trend zvyšování úrovně žárupevnosti v jednotlivých typech ocelí je soustředěn na další zlepšení substitučního zpevnění přísadami W a zejména B, a to jak u nízkolegovaných, tak u feritických ocelí. V této souvislosti je možno uvést novou euroocel E911, resp. japonskou Nf616, které vedle přísad do cca 2 % W legují ocel bórem do obsahu 0,0007 % (Nf616; P92). Nicméně je třeba upozornit, že původní předpoklady garance žárupevnosti 600°C/180 MPa vycházející z relativně krátkodobých zkoušek tečení jsou v současné době redukovány na úroveň 600°C/120 až 140 MPa. Za zmínku stojí rovněž připravovaný vývoj nové značky P93 české výroby využívající jak nízkolegování bórem a dusíkem, tak omezením obsahu W a jeho plnou náhradou molybdenem. Nicméně, zavedení těchto nových ocelí do průmyslového využití bude otázkou dalšího zkoušení co do rozsahu i prodloužení zkušebních časů. [15]

2 Obrábění korozivzdorných ocelí [17,18,19,20]

Kvůli jejich rozdílným vlastnostem v porovnání s uhlíkovými oceli jsou pro obrábění korozivzdorných ocelí požadovány mírně rozdílné technologické podmínky. Obrobitelnost korozivzdorných ocelí v žíhaném stavu ve srovnání s uhlíkovými oceli (100%) je : 70% pro feritické a 50% pro austenitické. Tento rozdíl je způsoben tím, že korozivzdorné oceli jsou spíše houževnaté než tvrdé.

Vlastnosti korozivzdorných ocelí mají výrazný vliv na jejich obrobitelnost. Těmito vlastnostmi jsou:

- relativně vysoká pevnost v tahu
- vysoký stupeň zpevnování, zvláště pro austenitické slitiny
- vysoká houževnatost

Tyto faktory vysvětlují tendenci materiálu tvořit nárůstek na břit nástroje při tradičních obráběcích operacích. Odcházející tříška působí vysokými tlaky na špičku nástroje. Tyto tlaky v kombinaci s vysokou teplotou na rozhraní tříška-nástroj způsobují navaření materiálu třísek na břit. Navíc nízká tepelná vodivost korozivzdorných ocelí přispívá k dalšímu hromadění tepla v místě řezu.

Austenitické korozivzdorné oceli jsou obecně považovány za těžko obrobitelné. To vedlo k postupnému vývoji nových, snadno obrobitelných druhů. Jsou zde také snadno obrobitelné druhy standardních feritických a martenzitických ocelí. K výraznému zlepšení obrobitelnosti těchto druhů dochází vlivem obsahu síranu manganu, který vzniká po přidání síry do oceli, a který má výrazný vliv na zlepšení lámavosti třísky. Snadno obrobitelné stupně mají výrazně nižší odolnost proti korozi než jejich těžkoobrobitelné ekvivalenty, právě vlivem přítomnosti těchto nekovových vměstků. Tyto stupně jsou obzvláště náchylné k důlkové korozi a nesmí být používány v obzvláště agresivních prostředích, jako je například mořská voda. Snadno obrobitelné stupně obsahující vyšší

obsah síry mají ale nižší tažnost, proto nemohou být např. ohýbány přes malé rádiusy, nebo kovány za studena. Kvůli přidání síry jsou však tyto stupně velmi obtížně svařitelné a neměli by proto být používány pro svařování. Austenitické stupně jsou také běžně dodávány v žháném stavu a většího významu než jejich zvýšená tvrdost, oproti uhlíkovým ocelím, nabývá jejich značný rozdíl mezi kluzu a pevností v tahu. Ke snížení růstu nárůstku a tím k minimalizaci deformačního zpevňování jsou proto používány vysoké posuvy a nižší řezná rychlost. Kde to je možné, tak je doporučováno použití nástroje s utvařecí třísek, obzvláště pro vysokolegované stupně, které jsou výjimečně tuhé a utvářejí vláknité třísky. Jelikož tepelná vodivost je dokonce nižší než u feritických stupňů má odvod tepla daleko větší význam.

Feritické stupně jsou obvykle dodávány v žháném stavu kvůli jejich houževnatosti. Charakteristiky jejich obrobiteľnosti jsou více podobné nízko legovaným uhlíkovým ocelím, spíše než ocelím s nižším obsahem uhlíku. Kvůli odlišnosti v tepelné vodivosti musí být zajištěn přiměřený odvod vzniklého tepla z obrobku a nástroje. Přehřívání může mít za následek otupení nástroje a místního spálení povrchu obrobku.

Pro feriticko-martenzitické stupně všeobecně platí, že čím vyšší podíl legujících prvků v oceli, tím náročnější a nákladnější je obrábění. Požadavky na vlastnosti materiálu, jako například odolnost proti korozi, omezují v určitých oblastech použití možnost přidávat do oceli potřebné množství přísad, zabraňujících vzniku nárůstku na břitu. Následující charakteristické vlastnosti a škodlivé důsledky jsou pro obrábění feriticko-martenzitických ocelí typické:

- silný sklon k deformačnímu vytvrzení (opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu)
- stabilní houževnaté chování (vysoké řezné síly a obtížný lom třísky)
- sklon k nalepování (tvorba nárůstku)

Při obrábění feriticko-martenzitických ocelí je pro většinu typů materiálů k dispozici oblast nízkých a vysokých řezných rychlostí. Mezi těmito oblastmi ($v_c = 40 - 90$ a $180 - 400$ m/min) leží problematická zóna vzniku nárůstku na břitu. V následující kapitole jsou uvedeny některá pravidla a doporučení, která při jejich respektování usnadní obrábění těchto materiálů.

2.1 Pravidla a doporučení pro obrábění korozivzdorných ocelí

Pravidla a doporučení, která je vhodné respektovat při obrábění korozivzdorných ocelí s ohledem na řezný proces obecně:

- Je velmi důležité přednostní nasazení obráběcích strojů stabilní konstrukce s vysokou tuhostí stroje a spolehlivostí chodu včetně. Protože pro obrábění korozivzdorných ocelí je obecně potřebný větší výkon, zařízení by mělo být využito maximálně do 75% výkonu potřebného pro obrábění uhlíkových ocelí.
- Nástroje a obrobky musí být co nejstabilněji upnuty. Nutno dbát na dodržení co nejmenšího vyložení jak nástroje, tak obrobku.
- Při frézování je možné použít odpovídající chladicí kapalinu. Kapalina by měla být přiváděna do místa řezu v dostatečném množství, aby se usnadnil odvod tepla. Dále musí být procesní kapaliny vybrány nebo upraveny tak, aby zaručili řádné mazání.
- Při hrubování a předdokončování je nutné dbát na to, aby pro následující dokončovací operaci zůstal dostatečný přídavek na obrábění, a to z důvodu, aby nástroj neřezal v zóně, ve které má ocel sklon k deformačnímu zpevňování.
- Doporučuje se sousledné frézování, protože nesousledné frézování znamená příliš dlouhou dobu kontaktu s vrstvou, ve které dochází k deformačnímu zpevňování a mimo to narůstají řezné síly.
- Z důvodu vyhnutí se hlazenému a zpevňovanému povrchu, zvláště u austenitických ocelí, musí být zajištěn rovnoměrný posuv. V některých případech může být nezbytné zvýšení posuvu a snížení řezné rychlosti.
- Jsou doporučeny nižší řezné rychlosti, obzvláště pro těžkoobrobitelné austenitické oceli, precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli nebo velmi tvrdé martenzitické oceli.

Zbytečně vysoká řezná rychlost má za následek opotřebení nebo poškození nástroje a tím vzniká časová ztráta pro přeostření, nebo výměnu nástroje.

Pravidla a doporučení, které je vhodné respektovat při obrábění korozivzdorných ocelí s ohledem na řezný nástroj:

- Nutno zvolit vhodný poloměr špičky pro dané použití. Nadměrně velký poloměr špičky zvyšuje nebezpečí vibrací.
- Menší, ale ještě dostatečně stabilní poloměr zaoblení ostří má za následek mnohonásobně lepší kontrolu třísky a nižší řezné síly.
- Použít geometrii břitu, která slučuje vysokou ostrost břitu s dostatečnou spolehlivostí ostří.
- Pro hrubovací operace by měly být břity opatřeny nejmenší možnou fasetkou.
- Důležité je zvolit takovou geometrii břitu, která umožní držet kontaktní tření mezi třískou a čelem břitu na co nejnižší možné míře.
- Dále je také nutné dbát na to, aby nedocházelo k příliš velkému opotřebení hřbetu. Opotřeбенý břit řeže hůře a způsobuje zpevnění materiálu obrobku. Nástroj pro dokončovací operaci je tím značně znehodnocován.
- Je vhodný menší úhel nastavení hlavního ostří (pod 90°). Při použití velkého úhlu nastavení může vzniknout tlustá tvrdá ostřina, která může způsobit rychlé opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě.
- Měl by být použit takový utvařec třísky, který zabrání odchodu třísek do řezu.
- Nástroje, jak RO tak SK, musejí být ostré s hladkým povrchem, aby došlo k minimalizaci tření mezi nástrojem a třískou. Ostrý břit zaručí nejlepší povrch a nejdelší životnost nástroje. Otupené nástroje způsobí hlazení a mechanické zpevnění povrchu. Nástroj musí být vyměněn nebo naostřen, jakmile se kvalita řezu začne zhoršovat. Případné naostření nástroje musí být provedeno strojně a nástroj musí být pevně upnut, ruční broušení nezajistí rovnoměrné naostření.

3 Integrita obrobeného povrchu [22, 23, 24, 25, 26, 27]

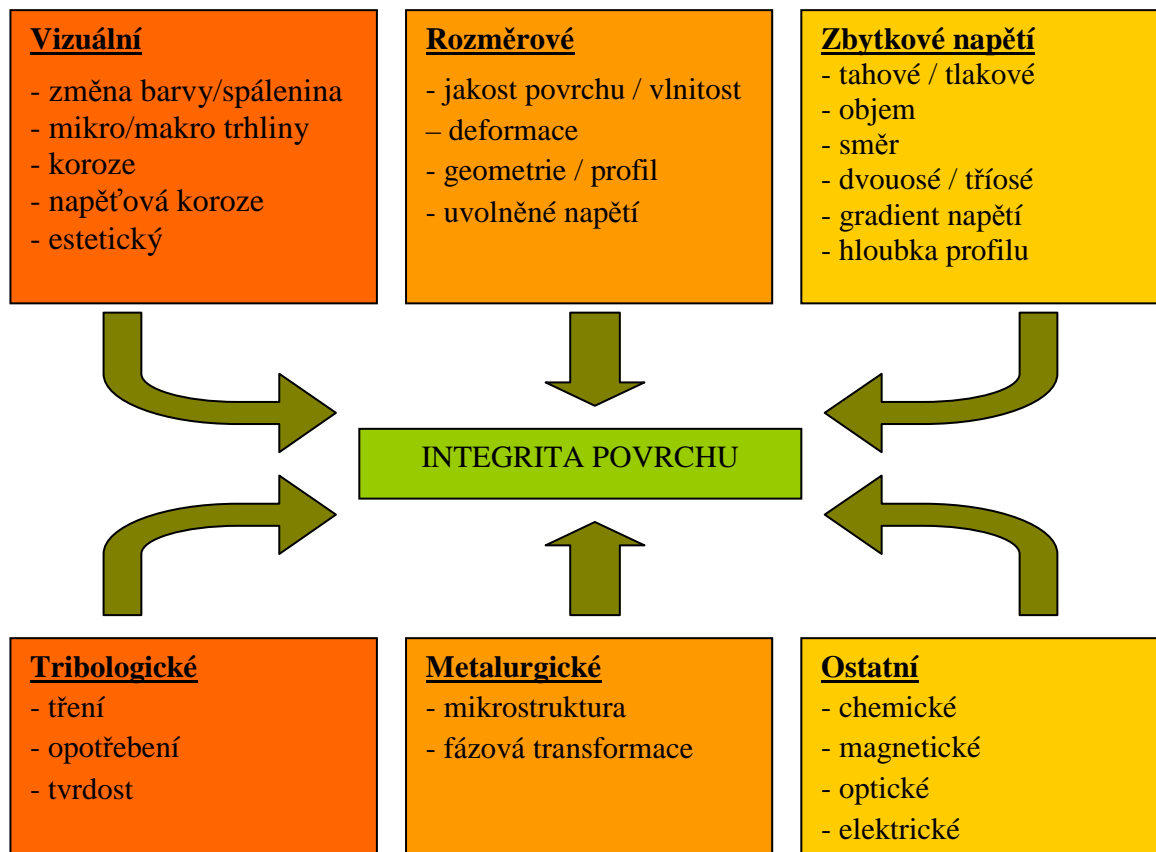
Z hlediska výroby má zásadní význam znalost mechanismu vytváření nového povrchu součástí, protože umožňuje pochopit povahu a vlastnosti takto vytvořeného povrchu. Tato znalost dává možnost pro zlepšení použitých procesů a případně umožňuje vytvoření obrobených ploch bez poruch. Všechny změny, které nastávají v povrchové vrstvě součásti, lze shodně posuzovat jako změny jakosti. Tyto změny se potom mohou dávat do vztahu s budoucí funkcí dokončené plochy a využívají se pro hodnocení její integrity. Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek.

Studium vlastností povrchové vrstvy napomáhá hodnocení vlivů technologických procesů a pracovních podmínek na jakost, tj. na vlastnosti povrchové vrstvy. Z tohoto důvodu je nutné sledovat jednotlivé parametry integrity obrobeného povrchu a podle jejich výsledných hodnot optimalizovat řezné a technologické podmínky tak, aby se jakost obrobeného povrchu blížila k ideální [24].

Zatím neexistuje způsob, kterým lze komplexním způsobem zhodnotit nově vytvořenou plochu z hlediska její integrity. Řada údajů o obrobené ploše se sice již běžně zjišťuje, pro jiné jsou zpracovány postupy a navrhována potřebná zařízení. Zatím nejspolehlivější zkouškou integrity je vlastní provoz. V následujícím odstavci jsou uvedeni někteří činitelé, kteří mohou ovlivňovat obrobený povrch součásti a o kterých můžeme hovořit jako o složkách integrity obrobeného povrchu.

Na povrch součásti v procesu výroby, montáže a používání působí mnoho vlivů, které mohou ovlivňovat stav povrchu, případně mohou vést k rozvoji poškození. Tyto vlivy lze rozdělit na vnější a vnitřní:

- Vnější vlivy:
- mechanické (provozní napětí)
 - chemické (koroze)
 - fyzikální (záření, bludné proudy apod.)
 - kombinace více vlivů (koroze pod napětím, elektrochemická koroze, ale také technologické procesy např. obrábění, tepelné zpracování, tváření)
- Vnitřní vlivy:
- zbytková napětí
 - morfologie povrchu (drsnost)
 - materiálové a mechanické vlastnosti povrchu (tvrdost, zpevnění, strukturní stav, povrchová úprava např. vrstvy, povlaky)
 - přítomnost povrchových a podpovrchových vad a heterogenní struktura



Obr.3-1 Šest skupin klíčových faktorů, které definují integritu obrobeného povrchu [22]

3.1 Jakost obrobeného povrchu [24]

Jakost obrobeného povrchu je možné posuzovat podle následujících hledisek, která vycházejí ze základních požadavků kladených na obrobený povrch:

- drsnost obrobeného povrchu
- vlastnost povrchové vrstvy
- přesnost rozměru a tvaru

Drsnost je bezprostředně ovlivněna procesem obrábění. Nejvýraznějšími prvky tohoto vlivu jsou řezná rychlost, geometrie břitu, druh řezného materiálu, opotřebení břitu atd.

Vlastnosti povrchové vrstvy jsou vyjádřeny hlavně strukturními změnami, stupněm zpevnění, které jsou úměrné velikosti zbytkových napětí.

Přesnost rozměru a tvaru je dána vlastní přesností stroje, tuhostí systému S-N-O a dalšími faktory, které ale působí nepřímo na technologický proces.

4 Parametry jakosti obrobeného povrchu [22, 23, 24, 25, 26, 27]

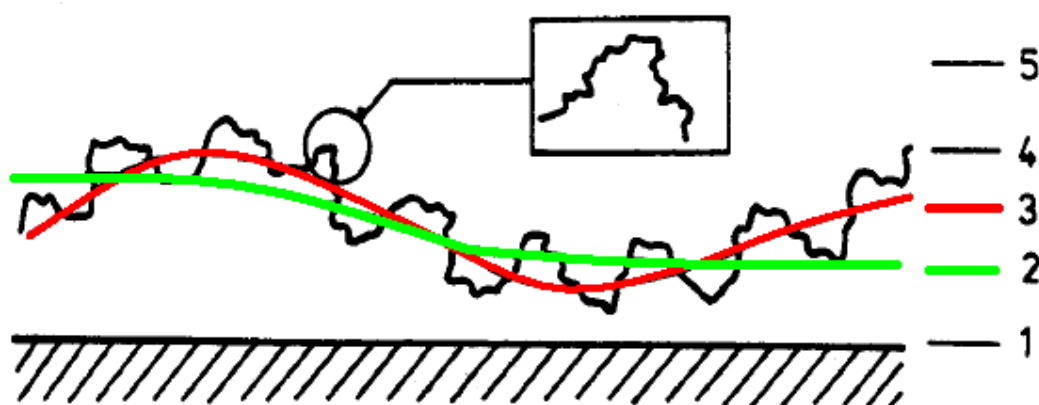
4.1 Drsnost obrobeného povrchu po obrábění

Veškeré technologické operace mají za následek alespoň minimální změnu jakosti povrchů. Zůstávají po nich určité nerovnosti, ať pravidelné, nebo nepravidelné. Tyto nerovnosti mají výrazný vliv nejen na funkci obrobeného povrchu, ale i na funkci celé strojní součásti. S tímto se počítá, a proto se také požadovaná jakost povrchu zapisuje již na konstrukční návrh a poté na výrobní výkres. Požadovaná struktura se zapisuje pomocí normovaných značek přímo k jednotlivým funkčním plochám. Úkolem konstruktéra je proto již od začátku konstrukčního návrhu uvažovat jak budou jednotlivé součásti na sebe navazovat, případně jak do sebe budou zapadat s ohledem na geometrickou přesnost a požadované parametry funkčních ploch. Tyto geometrické a strukturní parametry je tedy nutné vzájemně formulovat.

Z důvodu dosažení správného funkčního povrchu je důležité, aby konstruktér správně předepsal drsnost obrobené plochy, aby technolog správně navrhl technologický postup (využití správného výrobního zařízení a dodržení předepsané drsnosti) a aby kontrolor správně obrobenou součást prověřil a případně upozornil včas na možné změny jak k horšímu tak i k lepšímu.

Stanovení vhodné charakteristiky drsnosti povrchu a její číselné hodnoty je tedy důležité jak z hlediska funkce a životnosti součásti, tak i se zřetelem k výrobním nákladům. Volba charakteristiky a velikosti drsnosti povrchu, směru nerovností povrchu a také související technologické realizace závisí na požadované funkci plochy. Drsnost povrchu nesmí být větší než dovoluje předepsaná funkce plochy; nesmí však být příliš malá, aby nedocházelo ke zbytečnému zvyšování nákladů na výroby, popřípadě také k ovlivnění funkce (např. příliš hladký povrch, který by byl příčinou snížení přilnavosti povlaku apod.). V současnosti není technologicky možné a často ani žádoucí vyrobit ideálně rovné a hladké povrchy. Vyrobené technické povrchy mají odchylky tvaru, polohy a drsnosti. Na **obr.4-2** je znázorněno schéma geometrických odchylek od ideálně hladkého povrchu v řezu, kde:

- 1 – ideálně rovný povrch
- 2 – odchylky tvaru a polohy
- 3 – vlnitost povrchu
- 4 – mikroskopické drsnosti
- 5 – submikroskopické nerovnosti



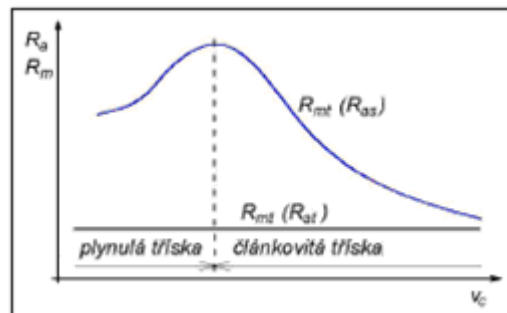
Obr.4-2 Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu [23]

Jedním ze základních způsobů hodnocení kvality povrchu je měření drsnosti povrchu. Drsnost povrchu je určována ze sledované plochy povrchu a je pak většinou charakterizována pomocí normou daných veličin (DIN EN ISO 4287).

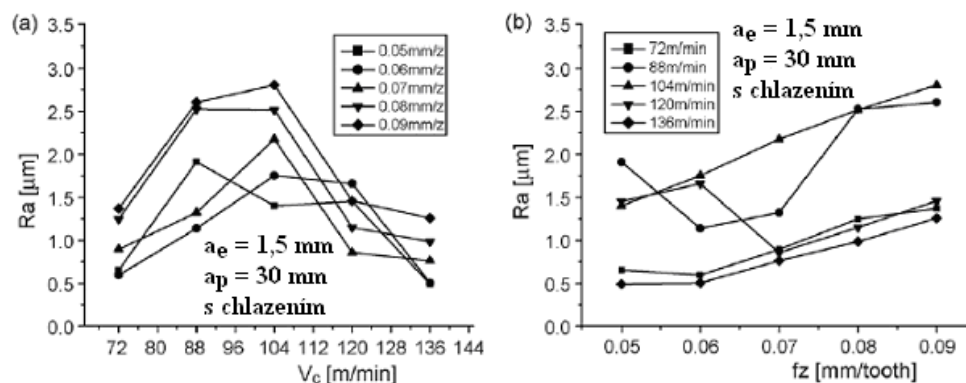
4.1.3 Vlivy řezného procesu na drsnost obrobeneho povrchu

[27],[29],[32],[33],[34],[35],[36],[40],[41],[42],[43],[44], [46],[52],[55],[65]

Přesné stanovení vlivu řezných podmínek na drsnost obrobeneho povrchu není jednoduché a ani jednoznačné. K dispozici je velké množství prací, které tyto závislosti většinou popisují, bohužel málo kdy vysvětlují. Největší část těchto prací je založena na experimentálním studiu, kdy je drsnost povrchu sledována spíše okrajově. Navíc v každé práci jsou použity různé nástroje (geometrie, řezný materiál) a různé řezné podmínky (v_c , f_z , a_p , a_e). Vyvození nějakých obecných závěrů porovnáním těchto různých prací tedy téměř nepřichází v úvahu. Vlivy jednotlivých řezných podmínek jsou navíc velmi provázány a v různých kombinacích působí na vznikající povrch jiným způsobem. Jednoznačně je popsán vliv posuvu na drsnost obrobeneho povrchu. Co se týče vlivu řezné rychlosti na drsnost obrobeneho povrchu, tak v tomto případě je spíše všeobecně znám a potvrzen pozitivní vliv, kdy se zvyšující se řeznou rychlostí se drsnost povrchu zlepšuje (*obr.4-3*). Je to způsobeno hlavně tím, že se zvyšující se řeznou rychlostí se zvyšuje teplota řezu a tím klesají řezné síly. Také se zmenšuje oblast plastické deformace, která méně ovlivňuje obrobeneho povrch. Proto je například nejlepších povrchů dosaženo pomocí HSC technologií, čímž může být upuštěno i od běžně používaných dokončovacích technologií (např. broušení) [65]. V následující části kapitoly jsou shrnuty praktické poznatky týkající se vlivu řezných podmínek na drsnost obrobeneho povrchu.

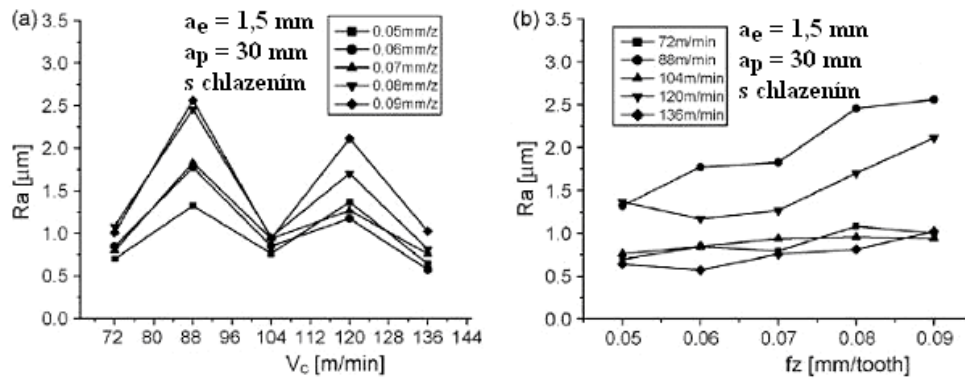


Obr.4-3 Závislost drsnosti obrobeneho povrchu na řezné rychlosti [27]



Obr.4-4 Závislost drsnosti povrchu na řezné rychlosti (a) a posuvu na zub (b) s použitím VBD s úhlem čela 28° [32]

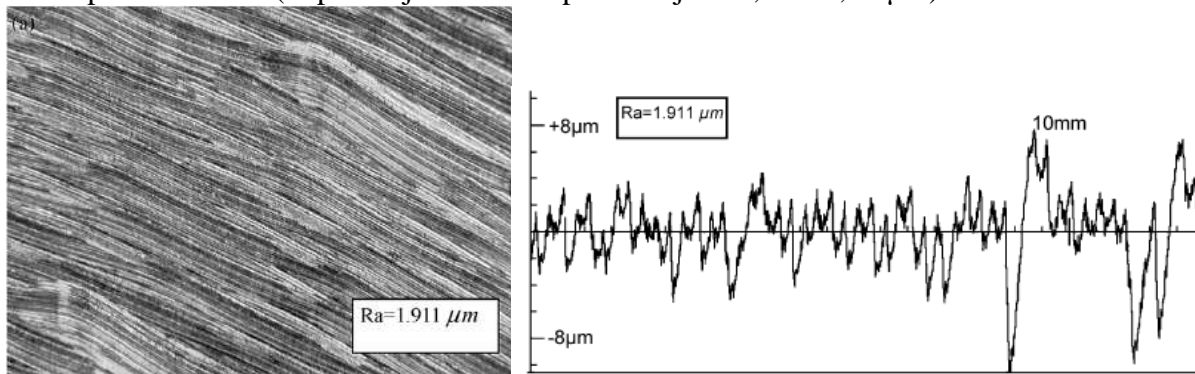
Na *obr.4-4* je zobrazena závislost drsnosti obrobeneho povrchu R_a obrobeneho nástrojem s destičkou typu APCR (s úhlem čela $\gamma_0=28^\circ$) na základních řezných podmínkách. Z *obr.4-4a* je patrné, že drsnost povrchu se zhoršuje se zvyšující se řeznou rychlostí, ale jen do určité hodnoty (oblast vzniku nárůstku). S dalším zvyšováním řezné rychlosti se drsnost obrobeneho povrchu opět zlepšuje. Vliv posuvu na drsnost obrobeneho povrchu je zobrazen na *obr.4-4b*. Drsnost obrobeneho povrchu se postupně zhoršuje se zvyšující se hodnotou posuvu při téměř všech řezných rychlostech.



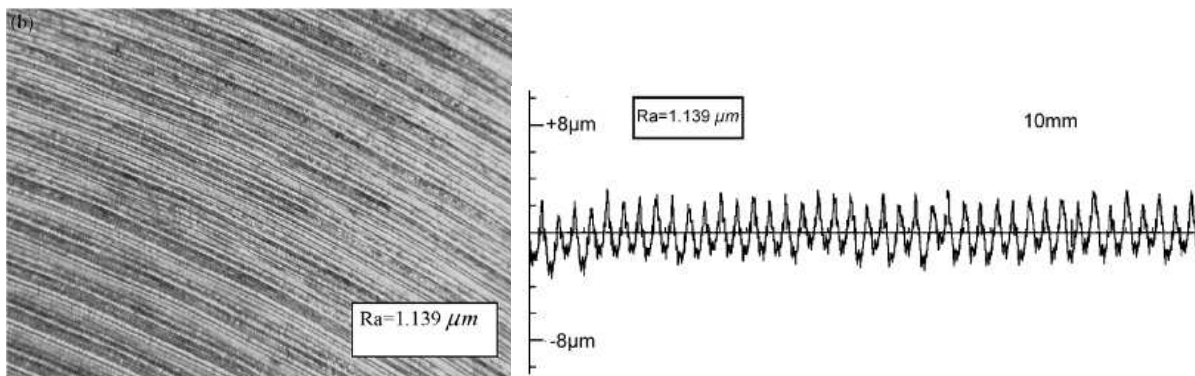
Obr.4-5 Závislost drsnosti povrchu na řezné rychlosti (a) a posuvu na zub (b) s použitím VBD s úhlem čela 17° [32]

Na **obr.4-5** jsou zobrazeny stejné závislosti jako v případě **obr.4-4**, avšak pro povrchy obrobene pomocí VBD typu APCT (s úhlem čela $\gamma_0=17^\circ$). Zde drsnost povrchu kolísá s narůstající hodnotou řezné rychlosti (**obr.4-5a**) a obecně se zvyšuje i se zvyšujícím se posuvem (**obr.4-5b**). Výrazné zhoršení drsnosti při řezných rychlostech $v_c = 88$ a 120 m/min je způsobeno vibracemi, neboť při těchto řezných rychlostech se některá část systému S-N-O dostává do vlastní frekvence, což má negativní vliv na průběhy drsnosti obrobeneho povrchu. V případě nástroje s větším úhlem čela (**obr. 4-4a**) to platí pro řezné rychlosti $v_c = 88$ a 104 m/min.

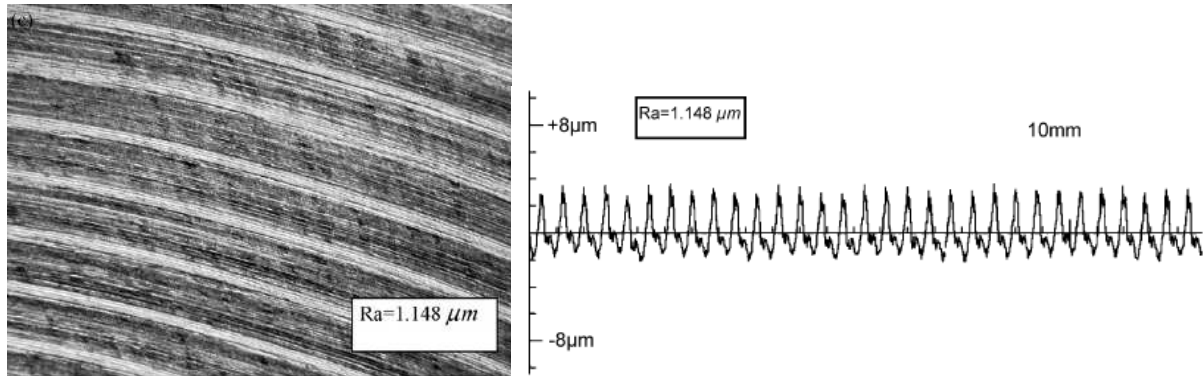
Na následujících obrázcích **4-6** až **4-11** jsou zobrazeny některé povrchy vytvořené pomocí různých řezných nástrojů. Navíc jsou zde zobrazeny i jejich povrchové profily. Na **obr.4-6** je zobrazen profil povrchu obrobeneho při řezné rychlosti $v_c = 88$ m/min a posuvu $f_z = 0,05$ mm/zub s odpovídající drsností $R_a = 1,91$ µm. Z obrázku je patrné, že během řezu docházelo ke značným rázům, což je způsobeno nestabilitou systému nástroj-obrobek při této kombinaci řezných podmínek. Změnou řezných podmínek se zvlnění a profil obrobeneho povrchu výrazně stabilizuje a drsnost povrchu klesá (odpovídající drsnosti povrchu jsou $1,14$ a $1,15$ µm) viz obr. 4-7 a obr.4-8.



Obr.4-6 Struktura obrobeneho povrchu VBD typu APCR při $v_c = 88$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/z [32]



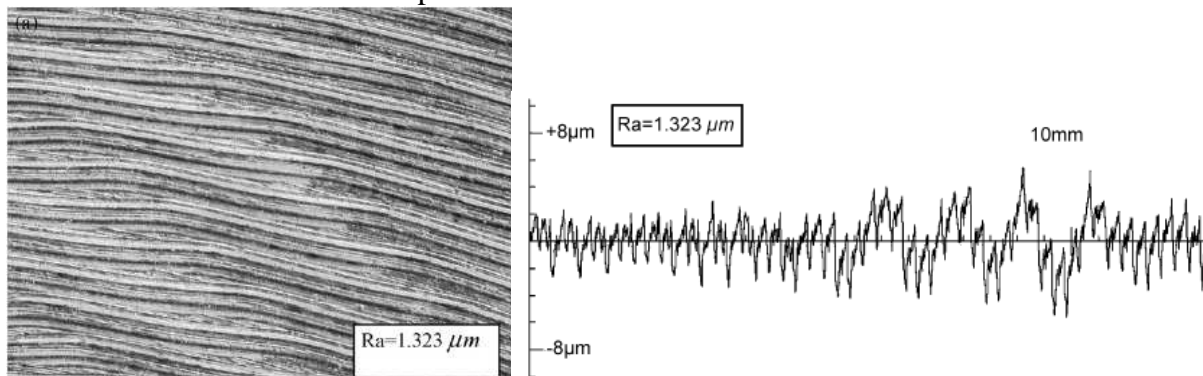
Obr.4-7 Struktura obrobeneho povrchu VBD typu APCR při $v_c = 88$ m/min, $f_z = 0,06$ mm/z [32]



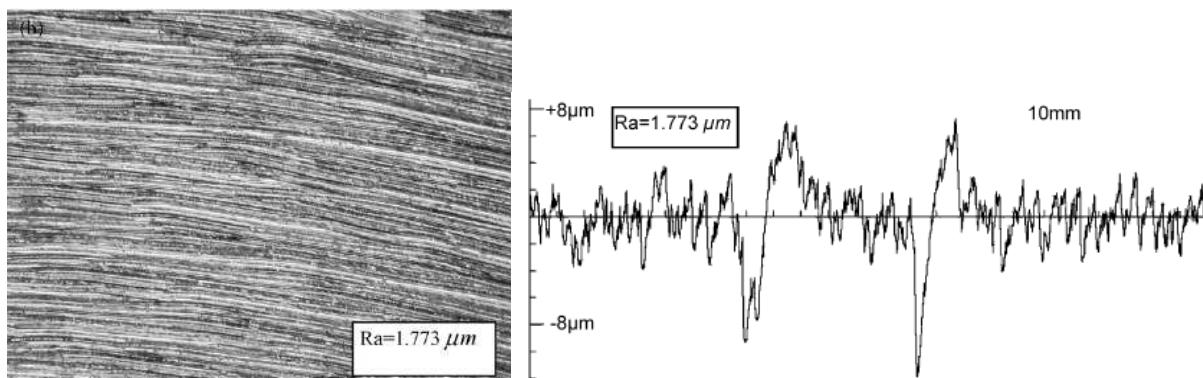
Obr.4-8 Struktura obrobeneho povrchu VBD typu APCR při $v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/z [32]

Nepravidelnost obrobeneho povrchu způsobena vlivem vibrací je patrná také u povrchů obrobeneho pomocí VBD typu APCT (s úhlem čela $\gamma_o=17^\circ$) viz **obr.4-9** a **obr.4-10**. Naopak, nízkou hodnotu drsnosti a velmi stabilní průběh má profil obrobeneho povrchu při řezné rychlosti $v_c = 120$ m/min zobrazený na **obr.4-11**.

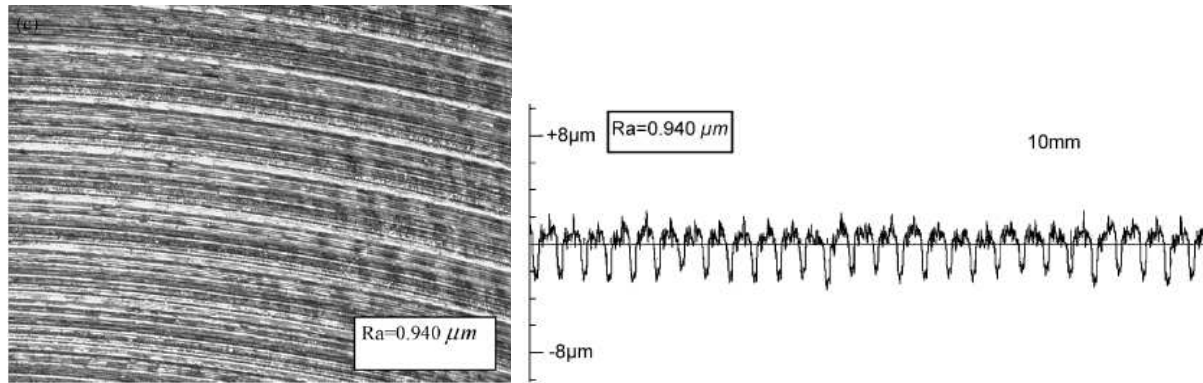
Vliv úhlu čela, který je v případě VBD typu APCR $\gamma_o=28^\circ$ a v případě VBD typu APCT $\gamma_o=17^\circ$, je také možno charakterizovat. Menší úhel čela má negativní vliv na velikost řezných sil, což se bohužel odrazí v náchylnosti k nestabilitě systému. Menší hodnoty úhlu čela totiž vytváří větší řezné síly při obrábění. Vyšší řezné síly vedou k větší nestabilitě systému a tím ke vzniku vibrací. Jak již bylo uvedeno výše, vliv vibrací na obrobeneho povrch je negativní a je proto také příčinou vzniku zvlněného profilu obrobeneho povrchu a vyšších hodnot drsnosti. Menší úhel čela sice inklinuje k delší trvanlivosti destičky, ale větší úhel čela inklinuje k stabilnějšímu řezu, což se odrazí v kvalitě obrobeneho povrchu.



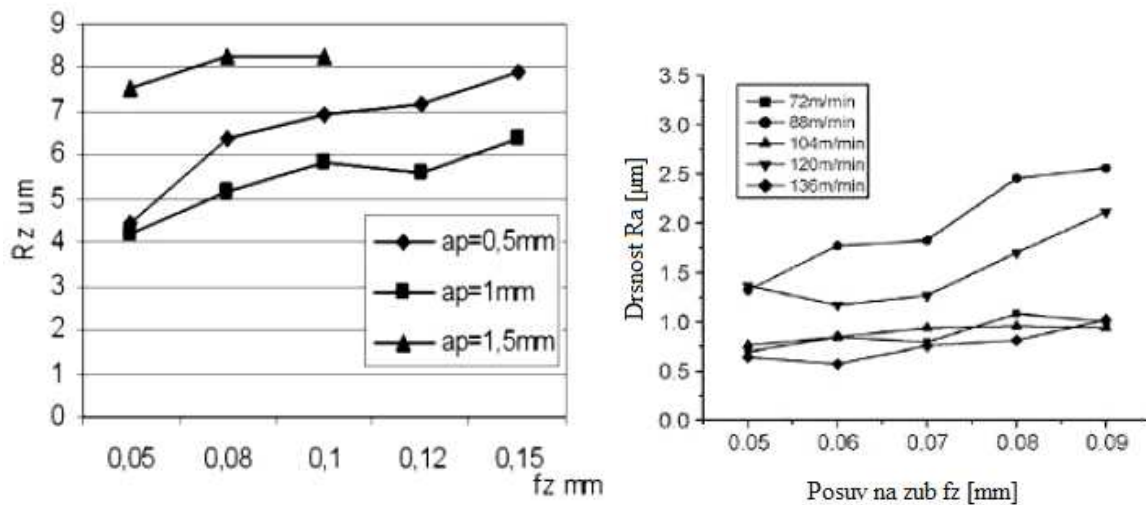
Obr.4-9 Struktura obrobeneho povrchu VBD typu APCT při $v_c = 88$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/z [32]



Obr.4-10 Struktura obrobeneho povrchu VBD typu APCT při $v_c = 88$ m/min, $f_z = 0,06$ mm/z [32]

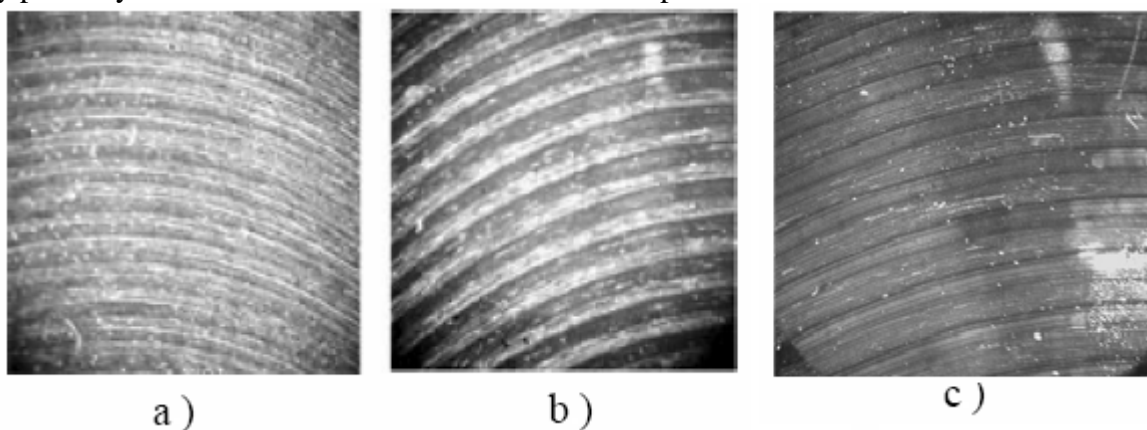


Obr.4-11 Struktura obrobeneho povrchu VBD typu APCT při $v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,07$ mm/z [32]



Obr.4-12 Vliv posuvu a hloubky řezu na drsnost obrobeneho povrchu [52]

Tvar obrobeneho povrchu po frézování (*obr.4-13*) vykazuje výrazné stopy po zubu nástroje a posuvu na zub. Z porovnání fotografií vyplývá, že zvyšováním posuvu a hloubky řezu se mění stopy po řezných břitech a tím také drsnost obrobeneho povrchu.

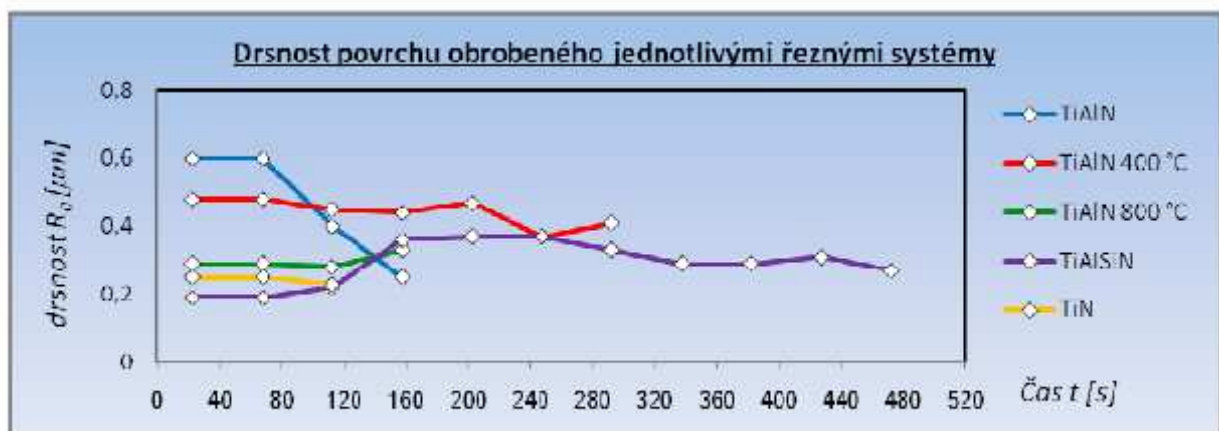


Obr.4-13 Stopy po frézování a) 12050.1, b) c) 14 240; a),b) $v_c = 80$ m/min, $a_p=1$ mm, $f_z=0,05$ mm; c) $a_p = 1,5$ mm, $f_z = 0,15$ mm [52]

Na drsnost obrobeneho povrchu má vliv také použitý řezný materiál. V tomto případě je ale potřeba rozdělit tento vliv na dvě samostatné skupiny. Mluvíme-li totiž o řezném materiálu, můžeme uvažovat jak samotný konstrukční materiál nástroje (slnutý karbid, keramika, CBN, cermet) nebo úpravu nástroje (povlak VBD, řezná geometrie). Vliv samotného konstrukčního materiálu je závislý

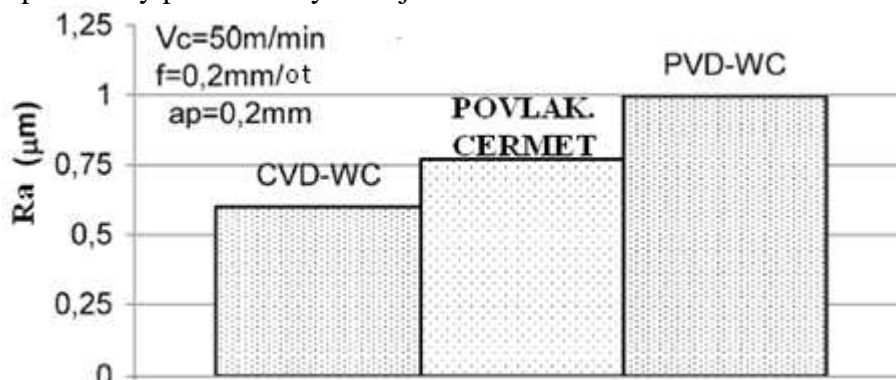
spíše na trvanlivosti než na jiných vlastnostech, nehledě na to, že jednotlivé řezné materiály mají vždy různou geometrii. Lépe se však hodnotí vliv povrchové úpravy nástroje (VBD), tzn. například povlaková vrstva. V takovém případě se většinou jedná o jeden základní řezný materiál – substrát, na který jsou nanášeny rozdílné vrstvy (systémy) a nejdůležitější roli zde hrají frikční vlastnosti jednotlivých vrstev.

Tak např. **obr.4-14** zachycuje porovnání dosažené drsnosti R_a výsledného povrchu obrobeného různými řeznými systémy aplikovanými na jednom typu VBD. Z obrázku je patrné, že po obrobení plochy všemi systémy bylo dosaženo vynikajících hodnot drsnosti nepřesahujících $R_a = 0,6 \mu\text{m}$. Výsledky získané měřením drsnosti obrobeného povrchu obrobku odpovídají předpokladům při použití dokončovací VBD s vodorovnou hladicí ploškou. Hladicí ploška byla příčinou zachování kvalitní drsnosti i té části povrchu, na které již došlo k vylomení břitu zkoumaných řezných systémů. Velikost lomu na vedlejším hřbetu břitu totiž u žádného ze systémů nepřesáhla šířku hladicí plošky $a = 1,4 \text{ mm}$, tudíž tato ploška dokázala vždy zahladit nerovnosti vzniklé větším opotřebením hřbetu – v případě, že se nejednalo o nerovnosti či rýhy pod úrovní roviny jmenovitého rozměru.



Obr.4-14 Vliv povlaku nástroje na drsnost obrobeného povrchu [55]

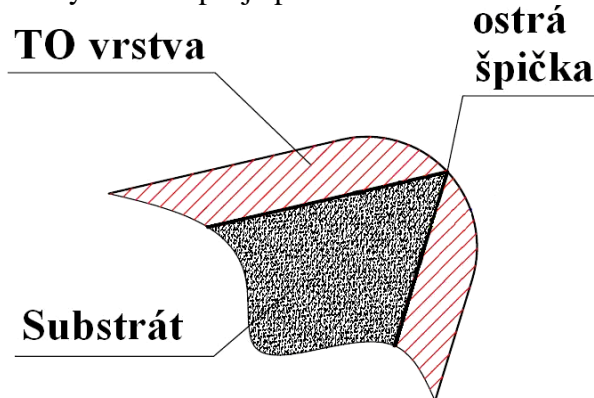
Na následujícím obrázku je také provedeno podobné porovnání. Zajímavostí je především to, že je zde možné provést zhodnocení vlivu aplikace povlaku na nástroj (VBD). I zde je však nutné si uvědomit souvislost s trvanlivostí nástroje. Vrstva nanášená metodou PVD totiž nedosahuje takové tloušťky jako vrstva nanášená metodou CVD, tudíž se nástroj s PVD vrstvou rychleji opotřebí a jím opracovaný povrch se vyznačuje horší drsností.



Obr.4-15 Hodnota drsnosti obrobeného povrchu po odebrání určitého objemu materiálu (1200mm^3) pro různé řezné materiály [46]

Vliv opotřebením nástroje na drsnost obrobeného povrchu je jednoznačný a potvrzený mnoha provedenými výzkumy a experimenty. Vlivem zvětšujícího se opotřebením se drsnost obrobeného povrchu vždy nejdříve postupně zlepšuje z počátečních hodnot. Poté se na nějaký čas ustálí a až po

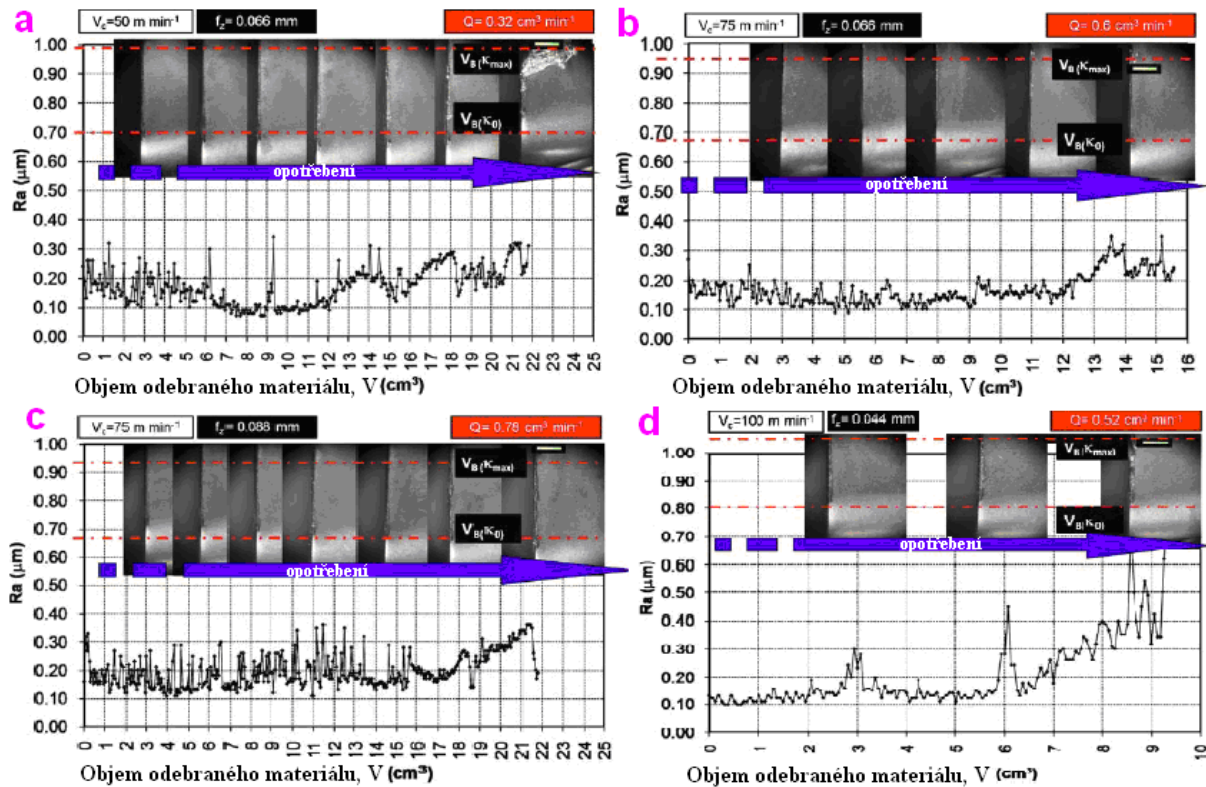
dosažení určité hodnoty opotřebení se drsnost obrobeneho povrchu začne zhoršovat. Hodnota kritériálního opotřebení, od které se začne drsnost postupně zhoršovat, závisí zejména na řezných podmínkách a řezném materiálu a je tedy pro každý jednotlivý případ obrábění odlišná. Tento krátkodobě pozitivní vliv opotřebení nástroje na drsnost obrobeneho povrchu je způsoben tím, že ve většině případů dochází v první fázi „zařezávání“ nástroje k jeho naostření. Na **obr.4-16** je zobrazeno schéma mikrogeometrie povlakovaného nástroje. Substrát je naostřen na maximální možnou hodnotu. Nanesením vrstvy ale dojde k zaoblení špičky nástroje, neboť není fyzicky možné nanést vrstvu tak, aby přesně kopírovala špičku. Na špičce je tedy tato vrstva nejslabší a nejnáchylnější k opotřebení. Již po minimálním opotřebení dochází tedy k odkrytí substrátu, a tím k dočasnému „naostření“ nástroje. Takový břit lépe řeže a způsobuje daleko menší plastickou deformaci v povrchu, čímž se výrazně zlepšuje právě drsnost obrobeneho povrchu.



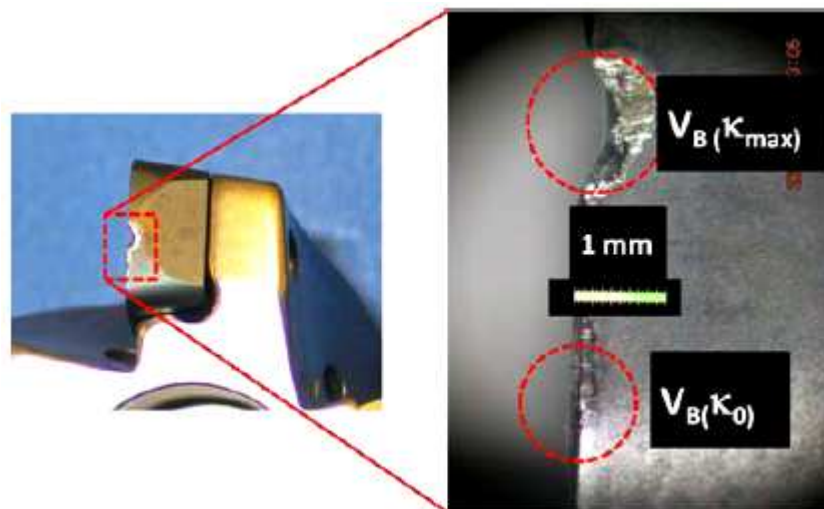
Obr.4-16 Teoretická mikrogeometrie řezného břitu

Na **obr.4-17** jsou zobrazeny průběhy drsnosti obrobeneho povrchu v závislosti na opotřebení nástroje. Zobrazení opotřebení v grafech je schématicky vysvětleno na dalším obrázku **4-18**.

Na prvním grafu (**obr.4-17a**) je nejlépe patrné zlepšení drsnosti obrobeneho povrchu v závislosti na zvětšujícím se opotřebení. Drsnost se nejprve pohybovala kolem hodnoty $R_a = 0,2\mu\text{m}$ a poté se její hodnota snížila až na $R_a = 0,1\mu\text{m}$. Po celou dobu se však držela pod hodnotou $0,3\mu\text{m}$. Jelikož obrobeneý povrch byl vytvořen částí ostří označenou jako κ_0 , nebyl tedy negativně ovlivněn ani výrazným vrubem v oblasti κ_{max} . Z **obr.4-17** je také možné pozorovat vliv základních řezných podmínek. Nejlepší drsnosti obrobeneho povrchu bylo dosaženo při řezné rychlosti $v_c = 100 \text{ m/min}$ (**obr.4-17d**), což potvrzuje pozitivní vliv zvyšující se řezné rychlosti. Porovnáním grafů b a c, kdy obrobeneý povrch vznikl za stejné řezné rychlosti ale za různé hodnoty posuvu f_z , se naopak potvrdí negativní vliv zvyšujícího se posuvu f_z na drsnost obrobeneho povrchu. Nicméně, je potřeba si také uvědomit vliv trvanlivosti nástroje celkově, neboť při řezné rychlosti $v_c = 100 \text{ m/min}$ bylo sice dosaženo nejlepších hodnot drsnosti obrobeneho povrchu, avšak na úkor trvanlivosti nástroje, kdy v tomto případě došlo k odebrání přibližně jedné poloviny materiálu v porovnání s ostatními řeznými podmínkami.



Obr.4-17 Drsnost obroběného povrchu v závislosti na opotřebení nástroje a různých řezných podmínkách [43]

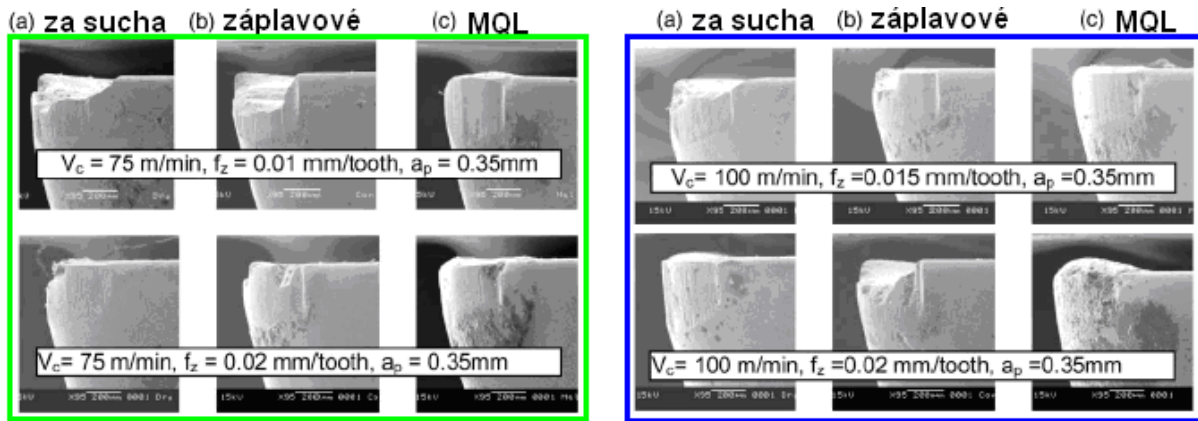


Obr.4-18 Rozložení opotřebení nástroje v závislosti na úhlu nastavení ostří κ_r [43]

4.1.5 Vliv řezného prostředí a teploty na drsnost obroběného povrchu

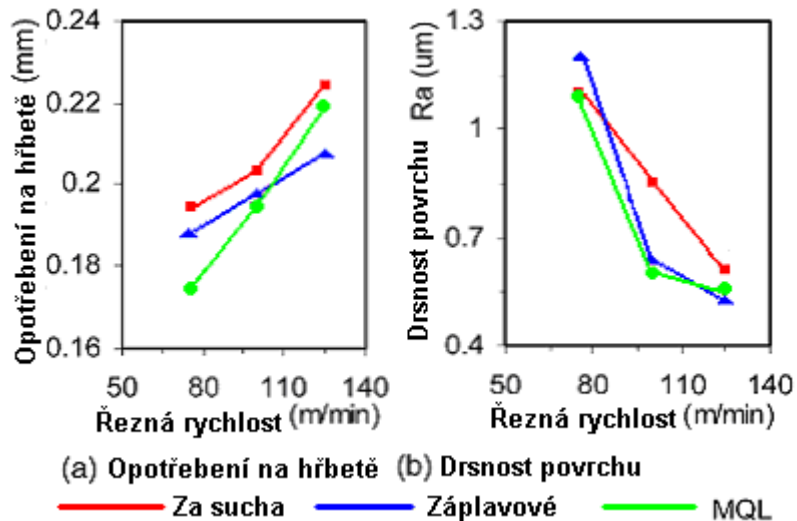
[45],[48],[50],[62],[64]

Vliv řezného prostředí na drsnost obroběného povrchu je také přímo závislý na opotřebení nástroje. Při porovnávání základních způsobů aplikace řezného prostředí je totiž opotřebení nástroje dominantním faktorem ovlivňujícím právě kvalitu obroběného povrchu. Základními způsoby aplikace řezného prostředí se rozumí obrábění bez jakékoliv procesní kapaliny, tzv. obrábění „za sucha“, klasické záplavové obrábění, kdy je do místa řezu přiváděno značné množství procesní kapaliny a metoda MQL, kdy se jedná o přívod minimálního množství procesní kapaliny do místa řezu (v následující kapitole se v případě MQL vždy jedná o olejovou mlhu). Na **obr.4-21** je zobrazeno opotřebení vyměnitelné břitové destičky ze SK po obrábění korozivzdorné oceli při aplikaci těchto tří základních způsobů aplikace procesního prostředí.



Obr.4-21 Opotřebení břitu nástroje v závislosti na použitém řezném prostředí, řezné rychlosti a posuvu na zub po 47 minutách řezu (SK P20) [48]

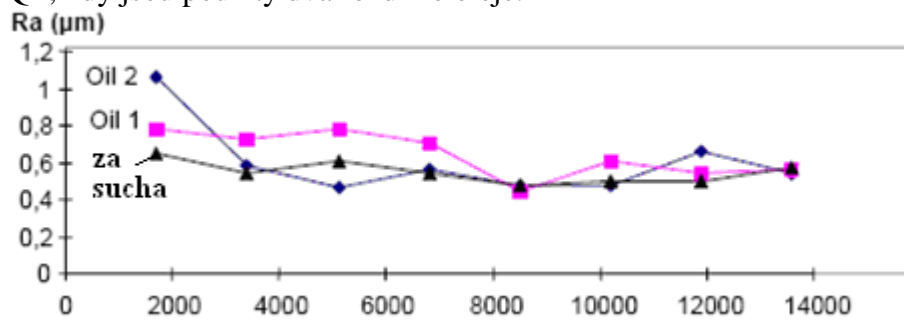
Z obrázku je patrné, že při obrábění za sucha a při aplikaci záplavového chlazení dochází k výraznému poškození břitu, ať již značným otěrem, nebo vylamováním ostří. Oproti tomu při aplikaci MQL nedochází k výraznému poškození břitu nástroje. Je jasné, že značné opotřebení nástroje má negativní vliv na drsnost obrobeneho povrchu, avšak do určité hodnoty opotřebení je tento vliv pozitivní. K tomuto pozitivnímu vlivu dochází jen za určitých podmínek. Hlavním činitelem je v tomto případě velikost zaoblení ostří nástroje. Je totiž známo, že mírně opotřebovaný nástroj dokáže dočasně vytvořit lepší povrch, než nástroj úplně nový, neboť v takové fázi dochází vlivem řezu k ještě lepšímu naostření nástroje (tzv. fáze „zařezávání nástroje“). Pokud ale opotřebení nástroje dosáhne hodnoty $VB_{max} = 0,3$ mm, poté se již drsnost obrobeneho povrchu pouze zhoršuje. Nicméně MQL svým pozitivním vlivem na trvanlivost nástroje působí pozitivně i na jakost obrobeneho povrchu v porovnání s ostatními řeznými prostředími [64]



Obr.4-22 Vliv řezné rychlosti, prostředí a opotřebení nástroje na drsnost obrobeneho povrchu [48]

Na **obr.4-22** je zobrazen vliv řezné rychlosti na opotřebení hřbetu nástroje a tím na drsnost obrobeneho povrchu pro různá řezná prostředí. Z obrázku je patrné, že při nižších řezných rychlostech je nejnižšího opotřebení dosaženo na nástroji při aplikaci MQL. Při vyšších řezných rychlostech ale převládá negativní vliv teploty řezu, a tak MQL ztrácí svou pozici, neboť za takových podmínek toto řezné prostředí není schopno nástroj dostatečně ochladit a ten se rychleji opotřebovává. Při vyšších řezných rychlostech dochází tedy bohužel k „smazání“ rozdílu mezi obráběním při aplikaci MQL a obráběním za sucha z hlediska dosažené drsnosti obrobeneho povrchu. Na **obr.4-23** jsou porovnány průběhy drsností R_a obrobeneho povrchů v závislosti na množství odebraného materiálu pro tři různá procesní prostředí při řezné rychlosti $v_c = 250$ m/min. Průběhy

drsností se pohybují pod hodnotou $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ a jsou velmi podobné. Jedná se o obrábění za sucha a s aplikací MQL, kdy jsou použity dva rozdílné oleje.

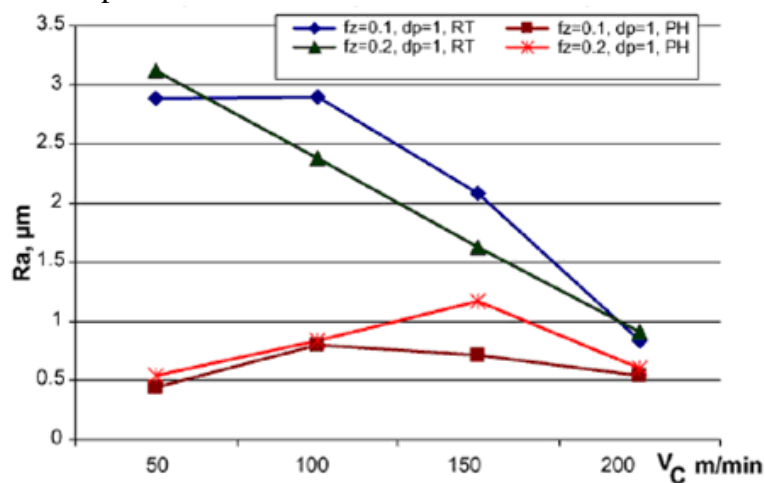


Obr.4-23 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na objemu odebraného materiálu [mm^3] pro různá řezná prostředí ($v_c=250\text{m/min}$) [62]

Z obrázku je navíc patrné, že se drsnost s narůstajícím objemem odebraného materiálu, čili časem obrábění, do určité hodnoty zlepšuje. Tento jev je způsoben také výše vysvětleným opotřebením nástroje – fáze „zařezávání nástroje“ [62].

Poměrně zajímavým vlivem, na drsnost obrobeného povrchu, je teplota obrobku. V tuto chvíli se nejedná o teplotu vygenerovanou samotným řezáním, ale o teplotu dodanou obrobku jiným, externím zdrojem. Nejčastěji se jedná o indukční ohříváč, který se pohybuje těsně před nástrojem a ohřívá obráběnou vrstvu materiálu.

Bylo dokázáno, že drsnost obrobeného povrchu, který byl předehřát (PH) na několikanásobně vyšší teplotu než je teplota pokojová (RT), je nižší, než drsnost povrchu obrobeného za pokojové teploty. Toto zlepšení je závislé na opotřebením nástroje, neboť při vyšší teplotě se nástroj pomaleji opotřebovává, zejména na špičce.



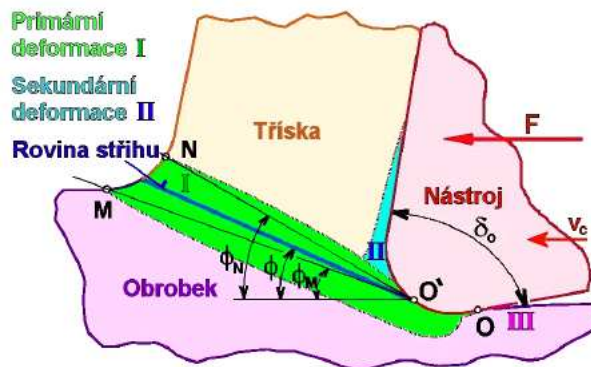
Obr.4-25 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na různých řezných podmínkách při pokojové teplotě a při předehřátém povrchu [45]

Pro příklad je zde uveden **obr.4-25**. Z něj je patrné, že hodnota drsnosti obrobeného povrchu R_a klesá se zvyšující se řeznou rychlostí při obrábění za pokojové teploty. To je způsobeno zvýšením teploty řezu, pozvolnému ubývání nárůstku a snižováním tření mezi nástrojem a obrobkem. Je také patrné, že se drsnost povrchu zhoršila se zvýšením řezné rychlosti z 50 na 100 m/min v případě předehřátého obrobku, avšak s dalším zvýšením v_c začala hodnota drsnosti klesat (pro obě hodnoty posuvů). To může mít souvislost s kontaktem nástroje a materiálu a také s mechanismem opotřebením.

4.3 Zpevňování obrobeného povrchu [53, 57, 72, 83]

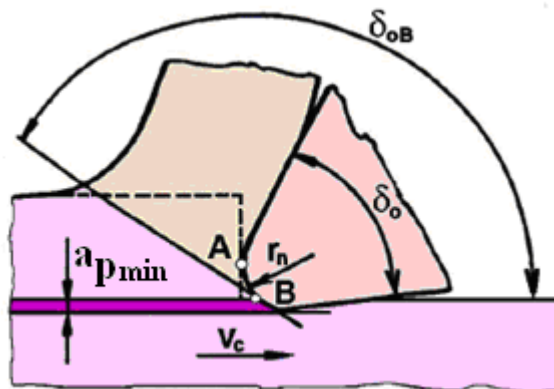
Frézování a obrábění obecně má největší a finální vliv na jakost obrobeného povrchu. Pokud se v dnešní době hovoří o jakosti obrobeného povrchu, hovoří se většinou jen o jeho drsnosti, případně o průbězích zbytkových napětí. Tyto dvě vlastnosti obrobeného povrchu jsou totiž nejdůležitější z hlediska funkce samotného obrobeného povrchu. V předchozích kapitolách je uvedeno, že povrch může být charakterizován větším množstvím vlastností. Z hlediska obrábění jsou, v závislosti na publikovaných pracích, patrně nejdůležitější drsnost, zbytkové napětí a zpevňování obrobeného povrchu.

V důsledku řezného procesu je povrchová vrstva obrobené plochy ovlivněna různými fyzikálními a někdy i chemickými procesy, které mají za následek změnu mechanických vlastností, strukturní transformace, různé vady, zpevnění, zbytková napětí a pod.

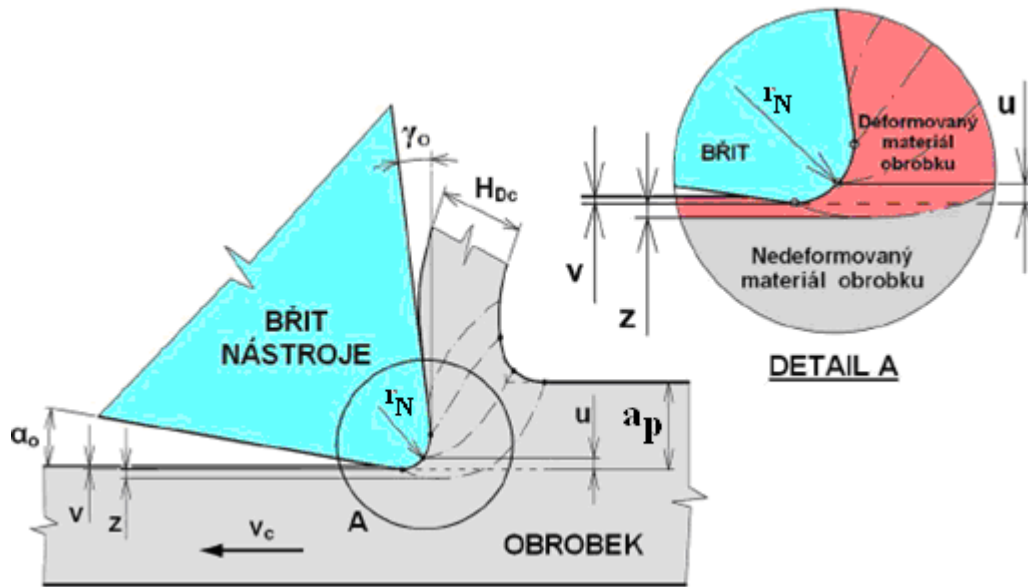


Obr.4-26 Oblasti plastických deformací v řezu [72]

Zpevnění povrchové vrstvy je způsobeno zejména tím, že oblast primárních plastických deformací často zasahuje pod úroveň budoucího povrchu (*obr.4-26*). Další vliv na zpevnění povrchové vrstvy souvisí se skutečností, že reálné ostří není nikdy tvořeno úsečkou, ale je částí válcové plochy o poloměru $r_N = 5 \div 20 \mu\text{m}$. V bezprostřední interakci bříty s materiálem obrobku se realizuje negativní úhel čela i úhel řezu (δ_{oB}) a budoucí povrch obrobené plochy nevzniká pouze řezáním, ale i tvářením. S uvedeným jevem souvisí též minimální hodnota jmenovité hloubky řezu $a_{p\text{min}}$, která je ještě pro dané řezné podmínky realizovatelná (*obr.4-27*). [72]



Obr.4-27 Vliv zaoblení ostří na obrobený povrch [72]

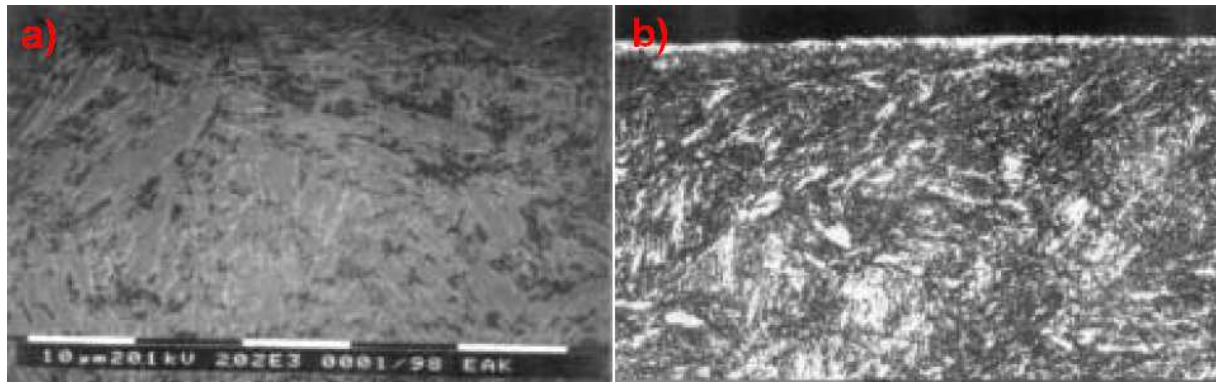


Obr.4-28 Vznik zpevněné povrchové vrstvy v důsledku reálného ostří [83]

Na **obr.4-28** je vyobrazen vznik zpevněné povrchové vrstvy. Vlivem poloměru zaoblení ostří r_N neodchází malá část odebíraného materiálu pryč z řezu ve formě třísky, ale je po překročení meze kluzu trvale deformována na povrchu obrobku (hloubka z). Bod, v němž k tomuto rozdělení dochází, je možno definovat jako tečný bod střižné (smykové) roviny k poloměru zaoblení ostří r_N . Tento poloměr r_N část třísky deformuje pouze v oblasti elasticity (hloubka u). Po projetí nástroje a pominutí napětí, vyvolaných vnikáním břitu do obrobku, se tato elasticky stlačená vrstva u vrátí zpět do původního stavu. To znamená, že obrobek se zvětší díky této stlačené vrstvě o hodnotu v . [83]

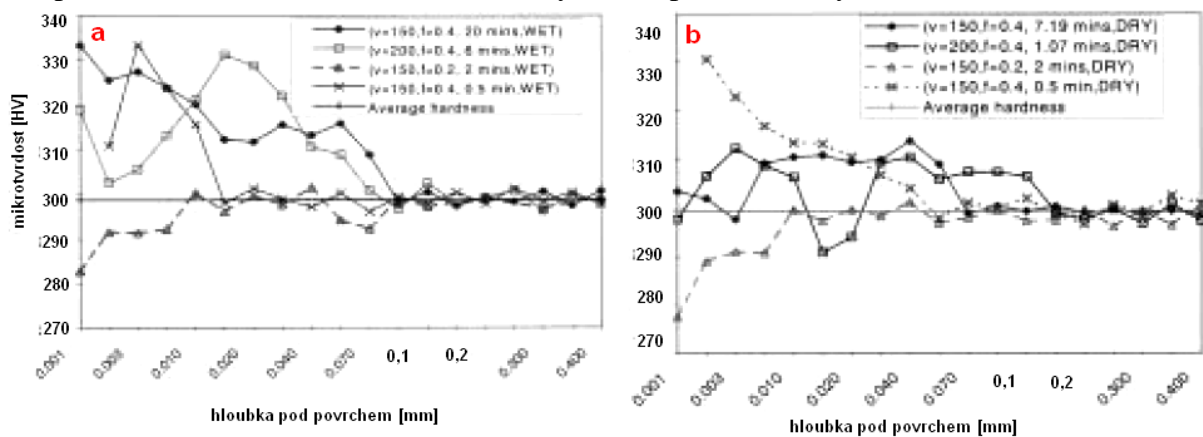
4.3.1 Mikrotvrдость obrobku

Mikrotvrдость obrobku je tvrdost, která se zjišťuje na úrovni mikroskopické, oproti běžným metodám měření tvrdosti. V některých případech tedy může jít i o tvrdost zrn materiálu. Tato mikrotvrдость se měří kolmo na obrobek na vytvořených výbrusech, aby bylo možno sledovat její průběh v závislosti na vzdálenosti místa náběru od obrobku. Změna mikrotvrlosti je nejčastěji způsobena plastickou deformací v obrobku, způsobené deformacemi při tvoření třísky. Plasticky deformovaný materiál se zpevňuje a tím se zvyšuje i jeho tvrdost. Hloubka tohoto zpevnění a tím i průběh mikrotvrlosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu je ovlivňován řadou faktorů, mezi něž patří řezné podmínky, obrobek, geometrie nástroje atd. Dalším činitelem, který ovlivňuje mikrotvrдость obrobku je teplota řezu. Ta může mikrotvrдость ovlivnit dvojím způsobem. Buď vlivem vysoké teploty řezu a následnému ochlazení obrobku, kdy rychlost ochlazení je ovlivněna řezným prostředím, může dojít k fázové přeměně struktury materiálu a tím se mění i mikrotvrдость. A nebo vlivem tepelné roztažnosti materiálu, která je ale omezena prostorem, dochází k další plastické deformaci po hranicích zrn, a tím i k změně mikrotvrlosti.



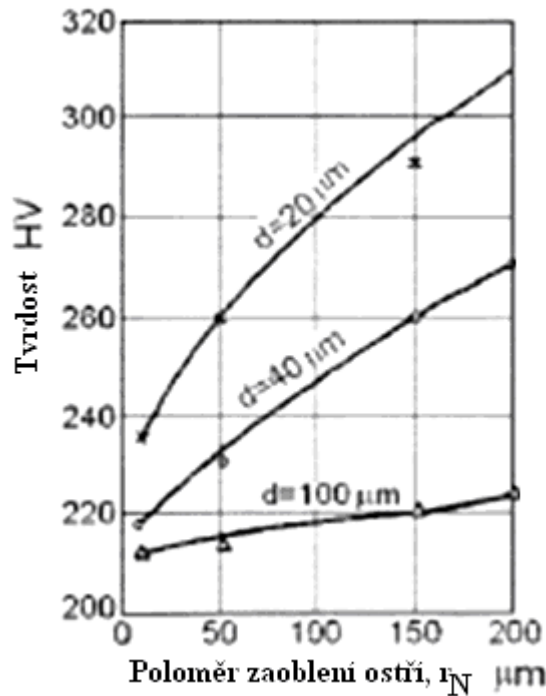
Obr.4-29 Mikrostruktura martenzitické oceli před (a) a po obrobení (b) [53]

Na **obr.4-29** je zobrazena mikrostruktura martenzitické oceli před obráběním (a) a po obrobení (b). Struktura před obrobením neukazuje žádné podpovrchové defekty, avšak během obrábění dochází k plastické deformaci na hranicích zrn a navíc vlivem vysoké řezné teploty došlo také k fázové transformaci a na obrobeném povrchu se vytvořila bílá vrstva, což je vrstva nepopuštěného martenzitu. V tomto případě došlo k výrazné plastické deformaci na hranici zrn vlivem tepelné roztažnosti materiálu a omezeným prostorem ve struktuře. Tím se objem zrn nemohl uvolnit a ta se po hranici deformovala, čímž došlo k vytvrzení povrchu a zvýšení mikrotvrdomosti.



Obr.4-30 Mikrotvrdomost obrobeného povrchu pro záplavové (a) a suché (b) obrábění [53]

Na **obr.4-30** je provedeno porovnání průběhů mikrotvrdomosti obrobeného povrchu pro dvě různá řezná prostředí, kdy na **obr.4-30a** se jedná o obrábění při nasazení záplavového chlazení a na **obr.4-30b** se jedná o obrábění za sucha. Teplota při obrábění je dost vysoká na to, aby došlo k fázové transformaci a došlo k přeměně feritu (železo α) na austenit (železo γ). Následné rychlé ochlazení povrchu způsobí transformaci austenitu na metastabilní vrstvu nepopuštěného martenzitu (bílá vrstva), která je obvykle křehčí a tvrdší než základní materiál. Z obrázků je patrné, že v případě obrábění s chladičem sahá hloubka deformace do 0,1 mm pod povrchem, zatímco při obrábění za sucha je tato hodnota 0,2 mm. Tepelně absorpční a vodivé vlastnosti chladiwa totiž mohou snížit teplotu obrobeného povrchu pod teplotu austenitické transformace. Zbytkové teplo potom může způsobit plastickou deformaci a/nebo přehřátí struktury. Kvůli nižší teplotě obrobku těsně pod obrobeným povrchem (ne tak vysoké pro fázovou přeměnu) a pomalému chlazení struktury dochází k popuštění struktury. Aplikace chladiwa sníží tuto řeznou teplotu, mající za následek plastickou deformaci. A tím dochází i k zmenšení tepelně ovlivněné a deformované vrstvy. Mimo samotných řezných podmínek má na velikost zpevnění povrchové vrstvy vliv také geometrie nástroje. Na následujícím obrázku **obr.4-31** je znázorněn vliv poloměru zaoblení ostří r_N na zpevnění obrobeného povrchu. Z obrázku je patrné, že čím větší je hodnota tohoto poloměru, tím více se obrobený povrch zpevňuje.



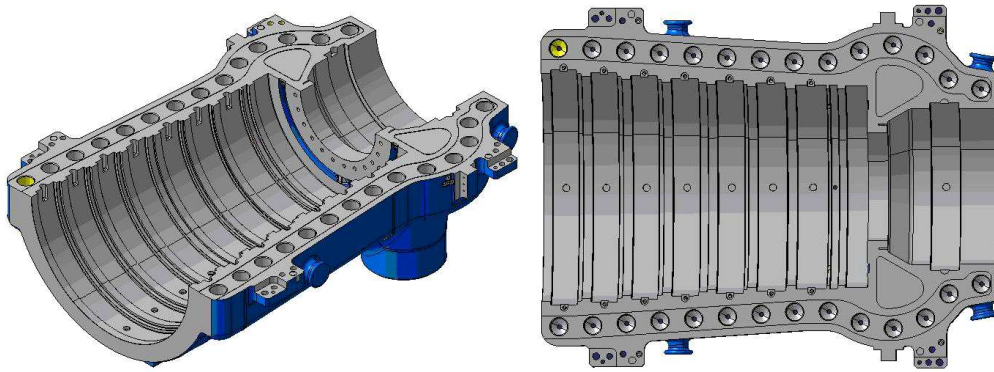
Obr.4-31 Vliv velikosti poloměru zaoblení ostří na zpevnění obrobeneho povrchu [70]

Zpevněná, tvrdší, vrstva může ovlivnit zejména opotřebení nástroje, což se může zpětně odrazit ve změně vlastností obrobeneho povrchu. Z výše uvedených informací je patrné, že deformace může sahat až 0,2 mm pod povrch. Následuje-li po takové operaci např. operace dokončování, kdy hloubka řezu může být daleko menší než 0,2 mm, je potřeba vzít v úvahu právě i zpevnění obrobeneho povrchu, neboť se jím výrazně mění vlastnosti materiálu třeba i v celém průřezu odřezávané vrstvy.

5 Shrnutí poznatků a stanovení cílů disertační práce

Poznátky z oblasti obrábění oceli P91 téměř nejsou. Jedná se totiž o relativně nový materiál v porovnání s ostatními korozivzdornými oceli. Byl sice vyvinut již v 80tých letech, ale jako materiál potrubních prvků (trubky, kolena, příruby) pro energetický a chemický průmysl. Proto se nejprve objevil pod označením T91 (tube = potrubí). Během posledních několika let se díky svým vlastnostem začal používat také jako konstrukční materiál pro turbíny. Avšak doposud pouze v omezeném množství oproti běžnějším konstrukčním materiálům. Pokud dnes existuje nějaká publikovaná práce týkající se tohoto materiálu, jde ze 60% o sledování možností dalších modifikací a ze 40% jde o oblast tváření a svařování. Jestliže jsou výrobci nuceni jej použít, musí se s jeho obráběním doslova „poprat“ aby dosáhli požadovaných výsledků, zejména co se kvality obrobeneho povrchu týče.

Na následujícím obrázku je zobrazen model vnitřního tělesa parní turbíny, vyráběný ve společnosti ŠKODA POWER s.r.o.



Obr.5-1 Model vnitřního tělesa parní turbíny [56]

Nejproblematictější je povrch dělicí roviny. Jelikož tyto turbíny pracují za vysokých teplot a tlaků, musí tato dělicí rovina splňovat přísné podmínky parotěsnosti. To znamená, že povrch musí být obroben na určenou hodnotu drsnosti a rovinnosti a navíc jsou sledovány stopy po nástroji. Drsnost se dá ovlivnit volbou nástroje a řezných podmínek. Významný vliv na drsnost má geometrie břitu nástroje, kde například výhodnější je volit větší úhel čela γ_0 , který zaručí větší stabilitu řezu a tím také lepší výsledný povrch. Dalším úhlem výrazně ovlivňujícím drsnost obrobeného povrchu je úhel nastavení hlavního a vedlejšího ostří κ_r a κ_r' . V tomto případě platí, že čím menší je tento úhel, tím lepší je dosažená hodnota drsnosti. V dnešní době se však stále více začínají používat různé dokončovací VBD s hladícími břity a v takovém případě není nutné se tímto úhlem detailněji zabývat. Co se řezných podmínek týče, nejlepších povrchů je dosahováno za vyšších řezných rychlostí, nižších posuvů a nižších hloubek řezu. Je zřejmé, že drsnost obrobeného povrchu většinou není přímým odrazem těchto podmínek, ale je spíše odrazem opotřebení nástroje. Proto je potřeba řezné podmínky volit tak, aby docházelo k co nejmenšímu opotřebení nástroje. Použité řezné prostředí má také vliv na drsnost obrobeného povrchu, ale v tomto případě je spíše důležitější jeho schopnost odvádět třísku z místa řezu tak, aby nedocházelo k poškození povrchu či břitu nástroje případným vtažením třísky pod nástroj. Proto se doporučuje používat procesní kapaliny.

5.1 Cíle disertační práce

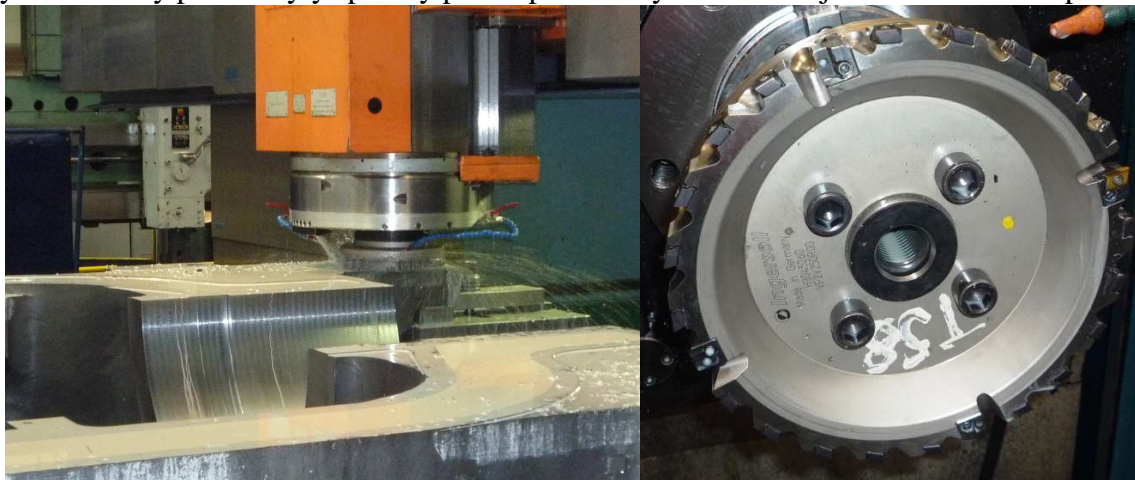
Hlavním cílem disertační práce je maximálně analyzovat a vyhodnotit obrobitelnost oceli EN ISO X12CrMoVNbN9-1 (ekv. ČSN 17 119, DIN 1.4903) při specifickém experimentálním frézování v režimu před-dokončování a dokončování. Specifičnost spočívá v tom, že se jedná o takové podmínky obrábění, které jsou adekvátní experimentálním možnostem pracoviště KTO a rovněž přenositelné pro reálné frézování dělicích rovin parních turbín. Práce je specifická také sledovaným materiálem zkušebního obrobku. Jedná se o speciální korozivzdornou feriticko-martenzitickou ocel, která je známá spíše pod obchodním názvem P91. Tento druh oceli patří mezi progresivní, avšak těžkoobrobitelné materiály. Poměrně unikátní chemické složení a struktura totiž zabraňují nasazení takových řezných podmínek, které se běžně používají při obrábění běžných typů korozivzdorných ocelí a pomocí nichž je dosahováno požadovaných jakostních parametrů obrobeného povrchu. Důvodem komplikovaného obrábění je zejména jeho struktura, protože v sobě kombinuje měkký ferit a tvrdý martenzit.

Konkrétní cíle jsou:

- I. Experimentálně vybrat nejvhodnější VBD pro režim předdokončování
- II. Experimentálně vybrat nejvhodnější VBD pro režim dokončování
- III. Analyzovat a vyhodnotit vliv řezných podmínek na řezný proces a stav obrobeného povrchu
- IV. Stanovit kombinaci řezných podmínek pro splnění zadaných požadavků
- V. Vytvořit soubor podkladů popisujících problematiku obrábění oceli P91

6 Projekt vs. disertační práce

Tato práce vychází z projektu, který byl řešen na Katedře technologie obrábění (FST/KTO). Jednalo se o projekt: „Zproduktivnění obrábění při rovinném frézování oceli P91“. Tento projekt byl řešen ve spolupráci se zadavatelem, společností ŠKODA POWER s.r.o. Úkolem bylo zproduktivnit obrábění při rovinném frézování dělicích rovin těles parních turbín, neboť právě frézování dělicí roviny je jednou z nejdůležitějších a nejproblematičtějších fází. Vezmeme-li dělicí rovinu tělesa parní turbíny jako konstrukční prvek výrobku, jsou na něj kladeny specifické požadavky, které musí splňovat. Tyto požadavky již byli specifikovány dříve (viz *kap.5*). Cílem samotného řešení projektu bylo najít takový řezný materiál a takové řezné podmínky, aby bylo zaručeno obrobení celé dělicí roviny naráz a aby přitom byly splněny přísné požadavky kladené na jakost obrobeného povrchu.



Obr.6-1 Frézování dělicí roviny tělesa parní turbíny a frézovací hlava Ingersoll, $\varnothing 315$ mm

V průběhu řešení projektu bylo zjištěno, že daná oblast je velmi problematická a bylo by vhodné ji podrobit širší analýze. Ta je cílem této práce. Tím, že tato práce vychází z řešeného projektu, byla pro ni také stanovena určitá omezení a specifikace. Nejdůležitějším omezením je objem získaných vzorků obráběného materiálu a také jednoznačné určení dodavatele řezných nástrojů. Experimentální vzorky byly vyrobeny souběžně s reálným tělesem na zakázku zadavatele projektu. Dodací lhůta takového vzorku se pohybuje v řádu měsíců (v tomto případě 6 měsíců). Objem těchto vzorků není neomezený. Prvotně musely být realizovány činnosti bezprostředně související se samotným projektem, poté až byly realizovány další činnosti, nezbytné pro tuto práci.

Práce se dělí na dvě základní kapitoly. Kapitulu, která je věnována fázi předdokončovací (*kap.8*) a kapitolu, která je věnována fázi dokončovací (*kap.9*). Obě kapitoly mají totožnou strukturu, která vždy začíná návrhem samotné části experimentu. Úkolem návrhu je vytipovat úzkou skupinu řezných materiálů a řezných podmínek, které by byly vhodné pro danou oblast obrábění. Ve spolupráci s dodavatelem nástrojů bylo vytipováno několik typů řezných materiálů (VBD), které se navzájem lišily z několika hledisek (substrát, povlak, geometrie). V případě předdokončování šlo o sedm typů a pro dokončování to bylo osm typů. Úkolem tzv. PRE-EXPERIMENTU bylo pomocí jednoduchého testování vybrat z této skupiny maximálně tři „favority“, které byly dále v rámci samotného EXPERIMENTU podrobeny hlubšímu testování. Bližší specifikace jednotlivých částí experimentální činnosti jsou uvedeny v jednotlivých kapitolách.

7 Charakteristika experimentálního studia

7.1 Experimentální vybavení

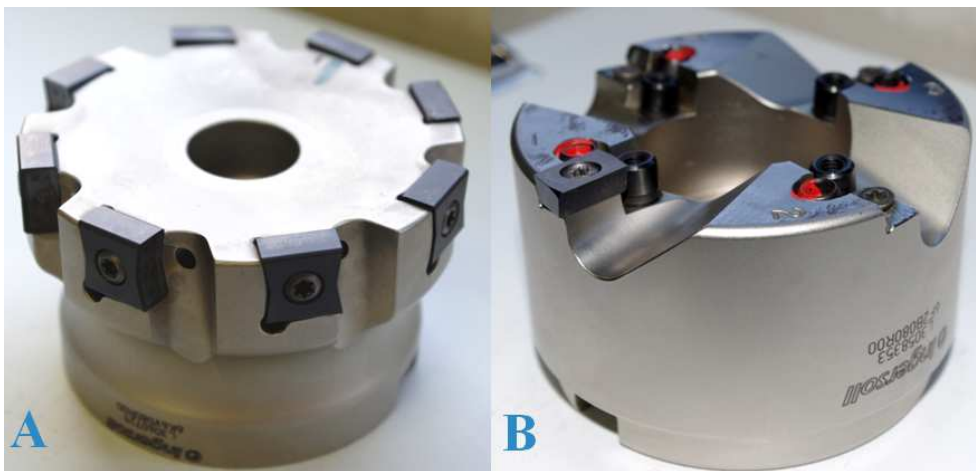
Experimentální vybavení, které bylo použito pro měření a vyhodnocování jednotlivých sledovaných veličin je uvedeno a blíže specifikováno v *příloze P-1*.

7.1.2 Nástroj

Experimentální studium bylo rozděleno na dvě části:

- 1) předdokončovací (*kap.8*);
- 2) dokončovací (*kap.9*).

V obou fázích byly jako nástroje použity frézovací hlavy o průměru 80 mm s tangenciálním uložením VBD od společnosti Ingersoll. Oba nástroje jsou blíže specifikovány v příloze. Frézovací hlava pro předdokončování v kapitole *P-2.1* a frézovací hlava pro dokončování v kapitole *P-2.2*.



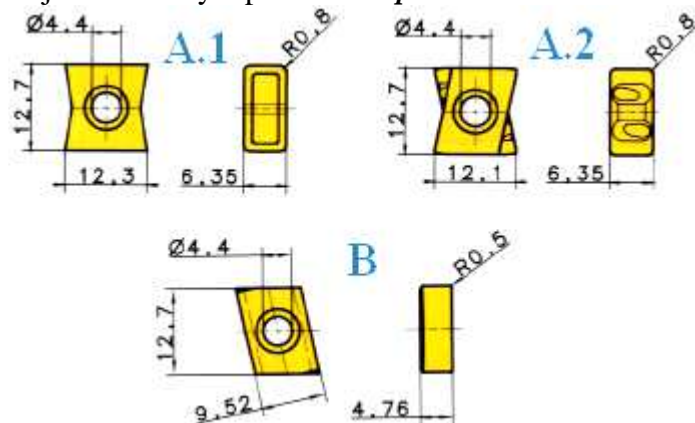
Obr.7-1 Nástroj pro předdokončování (A) a dokončování (B)

7.1.3 Řezné materiály

Experimentální studium bylo rozděleno na dvě fáze:

- 1) předdokončovací;
- 2) dokončovací.

V obou fázích byla testována celá řada řezných materiálů. U předdokončování šlo o sedm typů VBD. Ve všech případech se jednalo o povlakované sliuté karbidy. V šesti případech měla VBD tvar typu *A.1* a v jediném případě tvar typu *A.2* (viz *obr.7-2*). Blíže specifikace VBD testovaných ve fázi předdokončování jsou uvedeny v příloze v *kapitole P-2.1*.



Obr.7-2 Typy použitých tvarů VBD pro předdokončování (A) a dokončování (B)

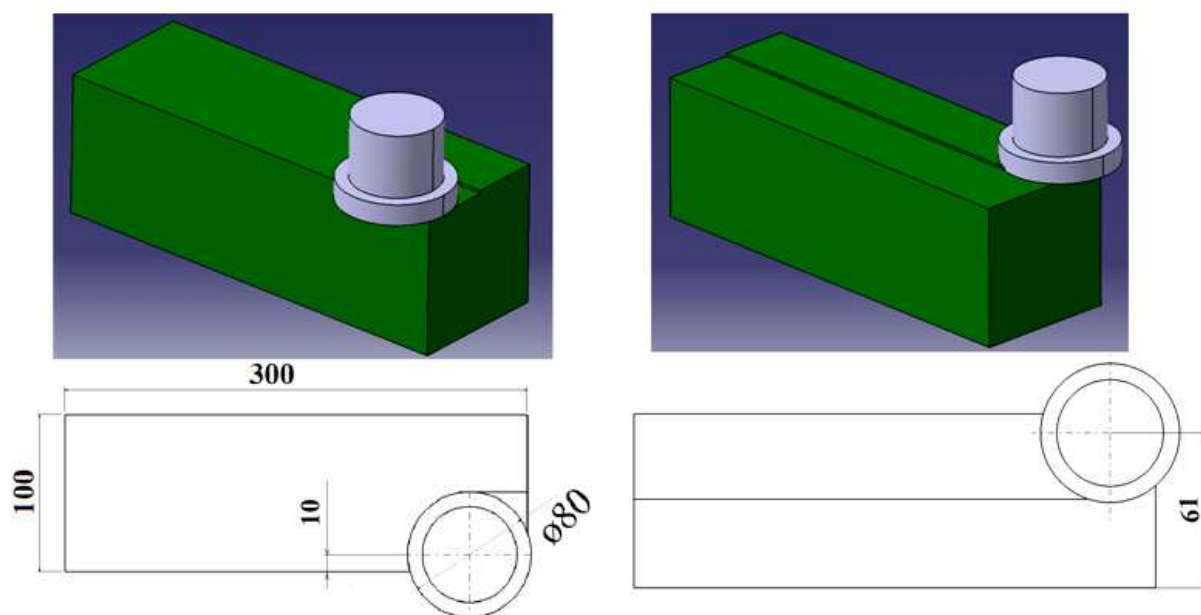
Ve fázi dokončovacího obrábění bylo testováno celkem osm typů řezných materiálů. Zde šlo v pěti případech o povlakovaný slinutý karbid, v jednom případě o nepovlakovaný slinutý karbid a ve dvou případech o povlakovaný cermet. Všechny VBD měli shodný tvar, na **obr.7-2** označený jako typ **B**. Bližší specifikace VBD testovaných ve fázi dokončování jsou uvedeny v příloze v **kapitole P-2.2**. Ve spolupráci s Katedrou materiálu a strojírenské metalurgie (KMM) byla v případě dokončovacích VBD provedena analýza chemického složení jak substrátů, tak také povlaků. Výsledky této analýzy jsou také uvedeny v příloze v **kapitole P-2.2.4**. V případech, kdy je stejný typ řezného materiálu použit jak pro dokončovací VBD, tak také pro předdokončovací VBD, mají obě VBD totožné složení a rozdíl je pouze ve tvaru VBD.

7.2 Experimentální obrobek

Experimentální obrobek byl dodán ve formě kvádrů o rozměrech 400x300x100 mm. Bližší specifikace materiálu obrobku je uvedena v **kapitole 1.2**. Pro snadnější manipulaci byl obrobek rozpůlen ve straně o délce 400mm. Obráběná plocha měla rozměr 300x100 mm. Jelikož se jedná o velmi specifický konstrukční materiál, bylo nutné ověřit, zda dodaný obrobek plně odpovídá požadavkům. Byl proveden materiálový rozbor. Více viz příloha kap. **P-1.8**.

7.3 Experimentální záběrové podmínky

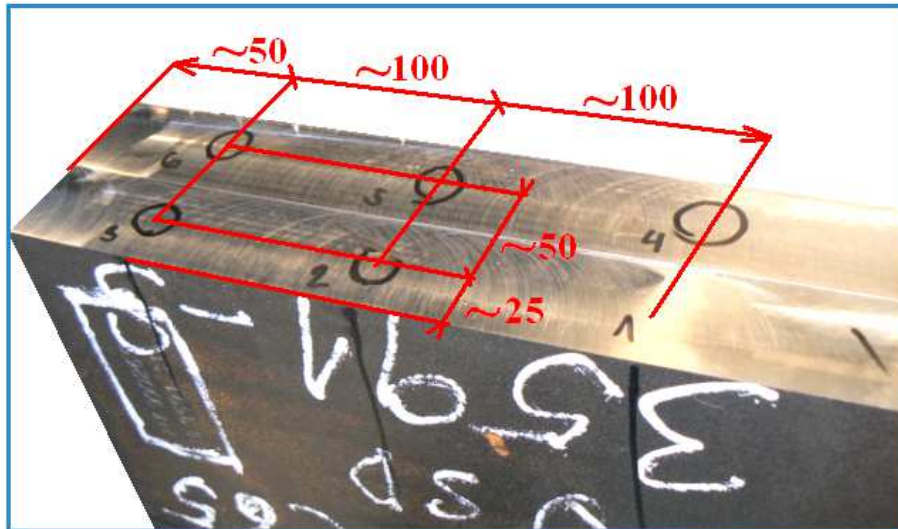
Na **obr. 7-10** jsou znázorněny experimentální záběrové podmínky. Jsou totožné jak pro předdokončování, tak pro dokončování. Rozdíl je pouze v hloubce řezu a_p a počtu VBD osazených v nástroji.



Obr.7-10 Schéma záběrových podmínek

7.4 Pravidla pro měření sledovaných veličin

Aby bylo možné průběžně získávat a měřit parametry obrobeného povrchu a tyto poté vzájemně porovnávat s co možná největší vypovídací hodnotou, bylo na povrchu obrobku zvoleno několik náměrných oblastí, které jsou stanoveny s určitou pravidelností, jak je zobrazeno na následujícím obrázku. Vždy šlo o tři oblasti na plochu obrobenou jedním přejezdem nástroje. V těchto oblastech byla měřena drsnost obrobeného povrchu a povrch byl také fotografován. Způsob rozložení těchto náměrných oblastí byl stejný pro celé experimentální studium, tedy jak pro předdokončování, tak pro dokončování.



Obr.7-11 Umístění náměrných oblastí na obrobku

Sledování parametrů charakterizujících obrobený povrch bylo prováděno v závislosti na měření opotřebení nástroje. Tyto parametry totiž není možné sledovat kontinuálně, ale řezný proces se vždy musí přerušit. Opotřebení nástroje (a souběžně s ním i parametry obrobeného povrchu) bylo zjišťováno vždy v určitých intervalech. Tyto intervaly se od sebe vzájemně lišily pro různé řezné materiály a různé řezné podmínky.

8 PŘEDDOKONČOVÁNÍ

Před-dokončování, nebo také polohrubování („semifinishing“), je předposlední fází ve výrobním řetězci z pohledu strojírenské technologie obrábění. Během této fáze bývá odstraněno přibližně 25-30% materiálu z přídávku, kdy přibližně posledních 10% zůstává na dokončování („finishing“). Z toho tedy vyplývá, že úkolem této fáze je odstranění přebytečného materiálu obrobku, případně odstranění nepřesností či stop po hrubování. Jakost obrobeného povrchu není v tomto případě zásadní, neboť k jejímu výslednému ovlivnění dochází až ve fázi dokončovací. Proto také v této fázi bývá nejčastěji omezujícím kritériem pouze trvanlivost nástroje, vyčíslená například ve formě maximální možné doby obrábění t [min;s], ujeté dráze nástroje l [m;cm;mm], nebo u složitějších ploch, případně za proměnných řezných podmínek ve formě objemu odebraného materiálu V [cm³;mm³]. V případě sledování trvanlivosti u různých řezných nástrojů za proměnných řezných podmínek je nejvhodnější sledovat trvanlivost v závislosti na objemu odebraného materiálu. Neboť ve většině případů platí, že čím více materiálu nástroj během své doby trvanlivosti, případně životnosti odebere, tím více se vyplatí a samozřejmě se to odrazí i v hospodárnosti obrábění.

Výstupy experimentálního studia ve fázi předdokončovacího frézování oceli P91 by měly být:

- 1) volba nejvhodnější VBD;
- 2) stanovení kombinace řezných podmínek, splňujících požadavky kladené na tuto fázi obrábění, zejména s ohledem na hospodárnost výroby;
- 3) analyzovat a vyhodnotit problematiku frézování oceli P91 ve fázi před-dokončovací.

Řešení je tedy navrženo tak, aby jeho výstupy, spolu s výstupy z druhé části experimentálního studia (dokončovací obrábění) maximálně splnily stanovené cíle této práce.

Experimentální studium bylo rozděleno na dvě etapy. První etapou byl tzv. pre-experiment (*kap.8.1*), druhou pak samotný experiment (*kap.8.2*). Úkolem pre-experimentu bylo vybrat ze skupiny 7 doporučených typů VBD 2 až 3 nejvhodnější typy, které budou v rámci samotného experimentu dále testovány. V obou těchto částech byla jako hlavní kritérium stanovena trvanlivost nástroje. Aby bylo možné podrobně analyzovat řezný proces byly sledovány následující veličiny: trvanlivost, silové zatížení, efektivní řezný výkon, stav obrobeného povrchu (drsnot, topografie, tvrdost, zpevnění).

8.1 PRE-EXPERIMENT

Hlavním kritériem obrobitelnosti této etapy je trvanlivost břitu VBD, která byla sledována v závislosti na opotřebení nástroje. Během obrábění bylo zjištěno, že k dominantnímu opotřebení VBD dochází vždy na hlavním hřbetě. Proto bylo právě toto opotřebení stanoveno za rozhodující. Byla zvolena hodnota kritériálního opotřebení $VBb/VB_N = 0,5$ mm. Čas dosažení tohoto opotřebení byl rozhodující pro volbu vhodného řezného materiálu. Ve spolupráci z dodavatelem nástrojů bylo vytypováno 7 druhů řezných materiálů (viz příloha *kap.P-2.1.2*). Ve všech případech se jednalo o povlakované slinuté karbidy. Podle značení výrobce se jedná o karbidy typu: IN2004, IN2005, IN2015, IN2030, IN2040, IN6510 a IN6515. Toto značení je používáno v celé práci.

8.1.1 Experimentální podmínky

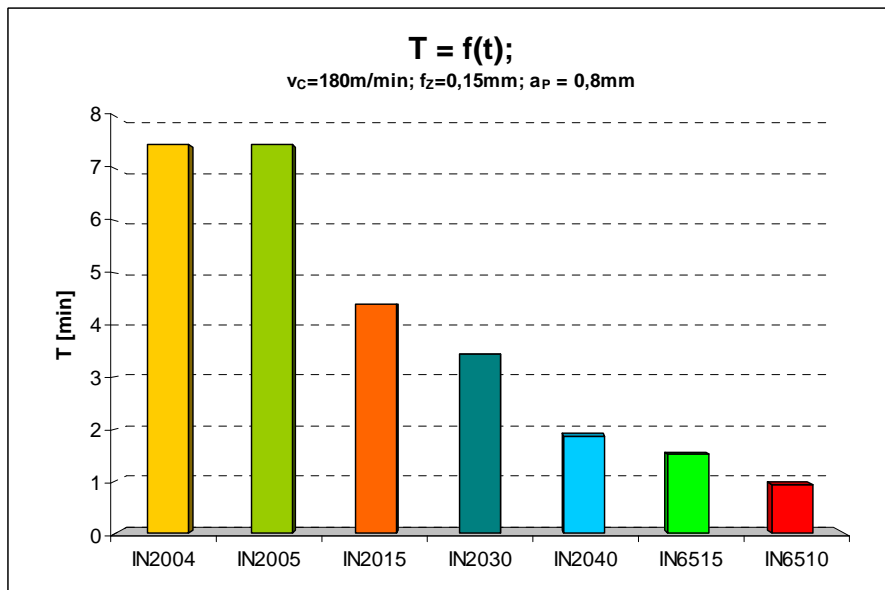
V *tab.8-1* jsou uvedeny experimentální podmínky, za kterých byl proveden pre-experiment. Za konstantní byly zvoleny tyto řezné podmínky: $v_c = 180$ m/min; $f_z = 0,15$ mm; $a_p = 0,8$ mm, a to z toho důvodu, že jsou používány při reálném obrábění v praxi. Vychází-li experiment z požadavku zproduktivnit obrábění, je nutné se odrazit od používaných řezných podmínek. Tyto řezné podmínky navíc vyhovovaly všem testovaným řezným materiálům. Z důvodu odvodu třísky z místa řezu bylo nastaveno záplavové chlazení, jak vnitřní tak vnější. Nástroj byl osazen pouze 4 VBD. To z důvodu intenzivnějšího zatížení nástroje a při tom zajištění určité plynulosti záběru, oproti např. testování pomocí pouze jedné VBD. Záběrové podmínky byly specifikovány v *kapitole 7.3*.

Experimentální podmínky	
PRE-EXPERIMENT	
v_c [m.min ⁻¹]	180
n [min ⁻¹]	716
f_z [mm]	0,15
v_f [mm.min ⁻¹]	432
a_p [mm]	0,8
chlazení	záplavové
počet VBD	4
sousedné frézování	

Tab.8-1 Řezné podmínky pre-experimentu

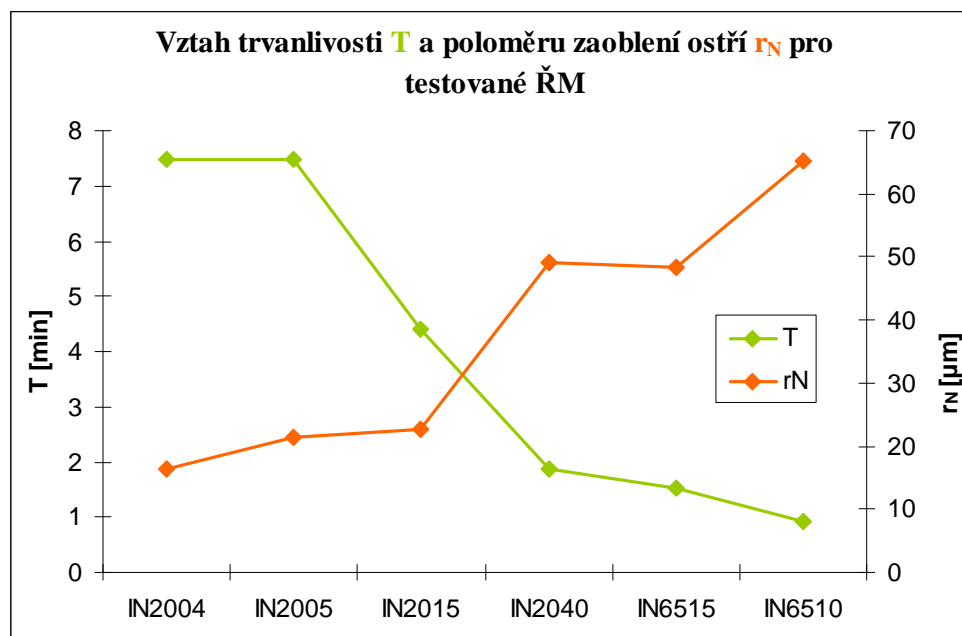
8.1.2 Trvanlivost řezného nástroje

Již v první grafu na *obr. 8-1* jsou zřejmé výsledky pre-experimentu. V grafu je provedeno porovnání všech zvolených druhů VBD v závislosti na jejich trvanlivosti. Nejlepšího výsledku dosáhly karbidy typu IN2004 a IN2005, kdy jejich trvanlivost dosáhla přibližně hodnoty 7,5 minuty. Tento čas je vztažen na celý nástroj, který byl v tomto případě osazen 4 VBD. Obrábění bylo ukončeno ve chvíli, kdy opotřebení na alespoň 1 VBD dosáhlo kritériální hodnoty. Nebylo podstatné, o jaký druh opotřebení se jedná. Ostatní druhy VBD dosáhly hodnot trvanlivosti pohybujících se pod 50%.



Obr.8-1 Porovnání trvanlivosti jednotlivých řezných materiálů

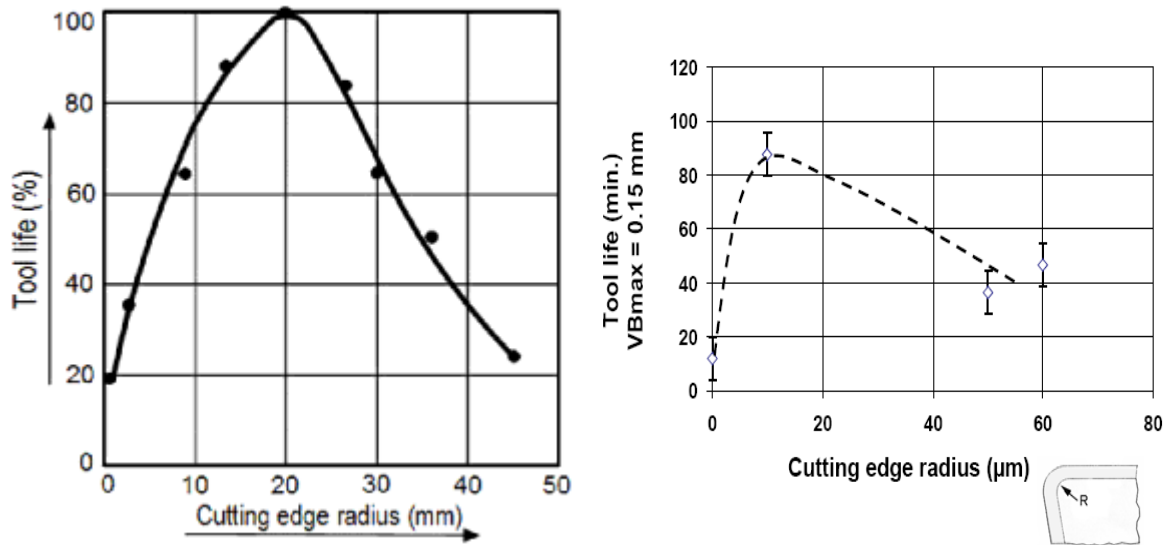
Ostatní druhy VBD se ukázaly jako nevhodné pro obrábění oceli P91 za daných podmínek. To může být způsobeno kombinací několika faktorů. Nízká trvanlivost může být způsobena jak vlivem substrátu či povlaku, tak také mikrogeometrií VBD. Mikrogeometrie VBD je závislá na použitém řezném materiálu. To znamená, že například čím jemnější je struktura substrátu, tím lépe je možné ovlivnit mikrogeometrie VBD, zejména poloměr zaoblení ostří r_N . A právě ve vztahu trvanlivosti VBD a poloměru zaoblení ostří r_N pro jednotlivé testované druhy VBD byl zjištěn určitý vztah, který je zobrazen na **obr.8-2**. Bližší informace o zjišťování hodnoty poloměru zaoblení ostří jsou uvedeny v příloze v kapitole **P-2.1.3**.



Obr.8-2 Vztah trvanlivosti T a poloměru zaoblení ostří r_N pro testované řezné materiály

V grafech na **obr.8-3** je zobrazen vliv velikosti poloměru zaoblení ostří r_N na trvanlivost nástroje. V obou případech je patrné, že nejvyšší trvanlivosti bylo dosaženo s nástroji, jejichž hodnota poloměru zaoblení ostří se pohybovala v intervalu 10 až 20 μm . Tomu v odpovídají VBD typu

IN2004, IN2005 a IN2015. Bohužel z tohoto zjištění není prozatím možné vyvodit jednoznačné závěry, neboť nelze pominout vliv řezného materiálu.



Obr.8-3 Vliv poloměru zaoblení ostří na trvanlivost nástroje při frézování (vlevo [66]) a při frézování PM-HSS frézou (vpravo [67])

Více informací z oblasti zjišťování trvanlivosti řezného nástroje v průběhu pre-experimentu je uvedeno v příloze v kapitole **P-4.1**.

8.1.3 Drsnost obrobeného povrchu

Viz příloha , kap. **P-4.2**.

8.1.4 Kapilární defektoskopická zkouška na mikrotrhliny

Viz příloha, kap. **P-4.3**.

8.1.5 Změna tvrdosti obrobeného povrchu

Viz příloha , kap. **P-4.4**.

8.1.6 Závěr pre-experimentu v oblasti předdokončování

Jak již bylo uvedeno v jednotlivých kapitolách, jako nejvhodnější VBD pro oblast dokončování s ohledem na dosažené výsledky byly jednoznačně zvoleny IN2004 a IN2005. Ty se osvědčily jak z hlediska dosažené trvanlivosti, která byla stanovena jako hlavní kritérium výběru, tak také z hlediska dosažené kvality obrobeného povrchu. Ostatní typy karbidů se pro obrábění oceli P91 více či méně nehodí. S jistotou lze říci, že by s jejich nasazením určitě nebylo dosaženo požadovaného zproduktivnění obrábění.

8.2 EXPERIMENT

Úkolem experimentálního studia frézování ve fázi předdokončovací je nalezení vhodného řezného materiálu a vhodných řezných podmínek pro obrábění oceli P91. V pre-experimentu se jako nejlepší osvědčily dva slinuté karbidy: IN2004 a IN2005. Tyto karbidy byly dále testovány za proměnných řezných podmínek. Navržené řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce **8-2**.

Experimentální podmínky	
EXPERIMENT	
řezný materiál	IN2004; IN2005
označení VBD	NNE324-100
v_c [m.min ⁻¹]	140; 180; 220
f_z [mm]	0,1; 0,15; 0,2
v_f [mm.min ⁻¹]	432
a_p [mm]	0,8
chlazení	záplavové
počet VBD	8
sousedné frézování	

Tab.8-2 Řezné podmínky experimentu

Nejprve byl, shodně pro oba typy VBD, sledován vliv řezné rychlosti na řezný proces. V závislosti na výsledcích byla zvolena jedna řezná rychlost, při které byl dále sledován vliv posuvu. Jak pro IN2004, tak pro IN2005 odpovídala nejvhodnější řezná rychlost $v_c = 140$ m/min. V tabulce **tab.8-3** jsou uvedeny kombinace testovaných řezných podmínek. Tyto podmínky byly shodné pro oba typy VBD. Jelikož se jedná o fázi předdokončovací, bylo stanoveno nejprve jedno kritérium, a to maximální opotřebení. Hodnota kritériálního opotřebení byla stanovena na $VB_N/VB_b = 500$ μm (0,5 mm). Brzy po začátku testování bylo zjištěno, že za určitých řezných podmínek dosahuje zejména IN2004 značné trvanlivosti. Z důvodu omezeného objemu materiálu experimentálního obrobku bylo nutné stanovit kromě kritériálního opotřebení další omezení, a to maximální množství odebraného materiálu. Tato hodnota byla stanovena na $V = 600$ cm^3 . Testování za daných řezných podmínek bylo tedy ukončeno ve chvíli, kdy bylo dosaženo kritériální hodnoty jednoho z těchto parametrů.

$v_c \setminus f_z$	0,1	0,15	0,2
140	X	X	X
180		X	
220		X	

Tab.8-3 Kombinace řezných podmínek

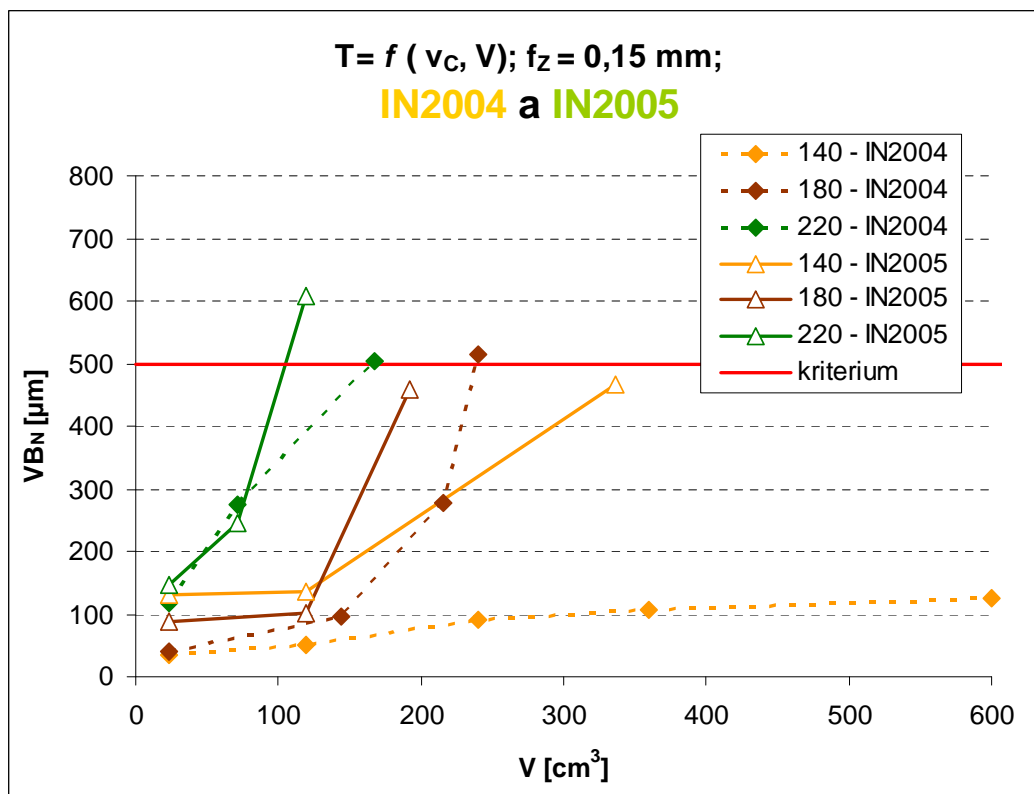
Dále bylo sledováno několik veličin, které charakterizují řezný proces. Jednalo se o trvanlivost (opotřebení nástroje - **kap.8.2.1**), drsnost obrobeneho povrchu (**kap.8.2.2**), celkové silové zatížení (**kap.8.2.3** a **8.2.5**), efektivní řezný výkon (**kap.8.2.4**) a v úplném závěru také zpevnění obrobeneho povrchu (**kap.8.2.6**.)

Z důvodu detailnějšího grafického vykreslení sledovaných závislostí byl také omezen rozsah jednotlivých grafů. Proto v některých případech nejsou vykresleny celkové průběhy sledovaných parametrů. Maximální dosažené hodnoty jsou vždy do grafu doplněny pomocí číselné hodnoty, připojené k průběhům závislostí, kterých se to týká. Experiment byl dvakrát opakován.

8.2.1 Trvanlivost

Trvanlivost řezného nástroje bývá nejčastěji kritériem, které rozhoduje o jeho volbě pro danou operaci. Vhodnou volbou řezných podmínek je možné trvanlivost ovlivňovat. Trvanlivost je přímo úměrná opotřebení nástroje. Proto je v této kapitole trvanlivost sledována jako průběh závislosti opotřebení na proměnných řezných podmínkách. V grafu na **obr.8-4** jsou zobrazeny průběhy opotřebení pro testované VBD v závislosti na objemu odebraného materiálu a velikosti řezné rychlosti v_c . Již na první pohled je jasné, že jako nejvhodnější řezná rychlost může být označena

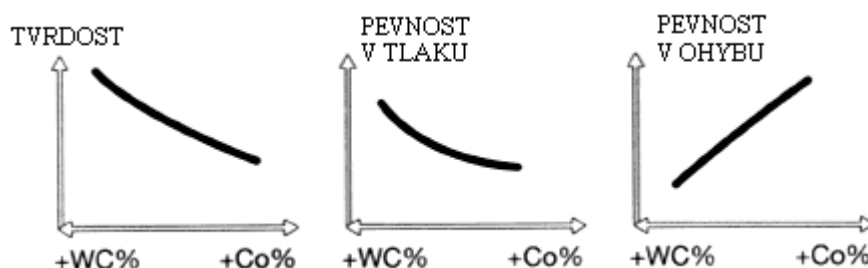
hodnota $v_C = 140$ m/min. To platí jak pro IN2004 tak také pro IN2005. Se zvyšující se řeznou rychlostí se zvyšuje teplota v místě řezu. Proto se zvyšuje intenzita opotřebení a tím se snižuje trvanlivost nástroje. Vliv řezné rychlosti na průběh opotřebení je tedy totožný pro oba řezné materiály. Porovnáme-li oba řezné materiály navzájem, je možné konstatovat, že za vyšších řezných rychlostí se chovají velmi podobně, a opotřebovávají se velmi rychle. Za nižší řezné rychlosti je ale rozdíl mezi jednotlivými průběhy opotřebení značný. Zatímco IN2005 dosahuje téměř kritériálního opotřebení již po odebrání necelých 400 cm^3 materiálu obrobku, IN2004 dosáhne pětiny hodnoty opotřebení IN2005 a odebere přitom téměř dvojnásobný objem materiálu obrobku.



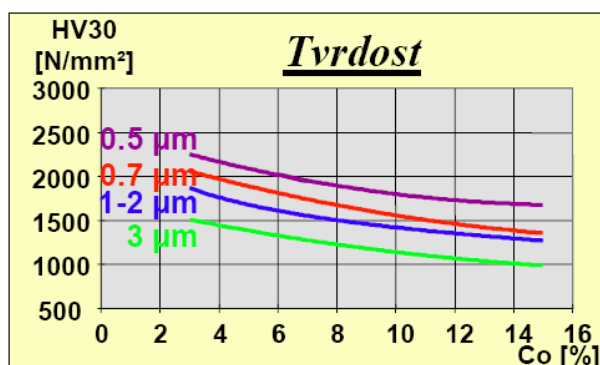
Obr.8-4 Závislost opotřebení řezného nástroje na objemu odebraného materiálu a řezné rychlosti v_C ; $f_z = 0,15$ mm; IN2004 a IN2005

V tabulce **P4-3** (příloha, **kap.P-4.5**) jsou zobrazeny snímky opotřebení pro oba typy karbidů v závislosti na řezné rychlosti. Vždy jsou zobrazeny alespoň dva snímky opotřebení. Pokud je tomu tak, odpovídají tyto snímky krajním bodům odpovídající křivky v grafu na **obr. 8-4**. Pokud jsou zde tři snímky, odpovídá ten prostřední průběžné fázi opotřebení. Ve všech případech se VBD opotřebovávaly ve tvaru vrubu. Tento vrub se nachází v oblasti maximální hloubky řezu, tzn. ve vzdálenosti přibližně 0,8 mm od špičky VBD.

Rozdíl mezi IN2004 a IN2005 je především dán chemickým složením a mikrogeometrií, přesněji velikostí poloměru zaoblení ostří r_N . Oba dva druhy mají stejný povlak a stejný tvar. IN2005 obsahuje 1,7x více kobaltu než IN2004 (viz **tab.P2-6**, příloha **kap.P-2.2.4**).



Obr.8-5 Vliv obsahu WC a Co na vlastnosti slinutého karbidu [17]



Obr.8-6 Vliv obsahu Co a zrnitosti na tvrdost slinutého karbidu [68]

Diagramy na **obr.8-5 a 8-6** znázorňují, že vyšší podíl kobaltu, vzhledem k jeho menší tvrdosti a pevnosti v tlaku, snižuje u slinutých karbidů odolnost proti opotřebení. Porovnání kladů a záporů způsobených vzrůstajícím procentem kobaltu ve SK je provedeno v **tab.8-4**.

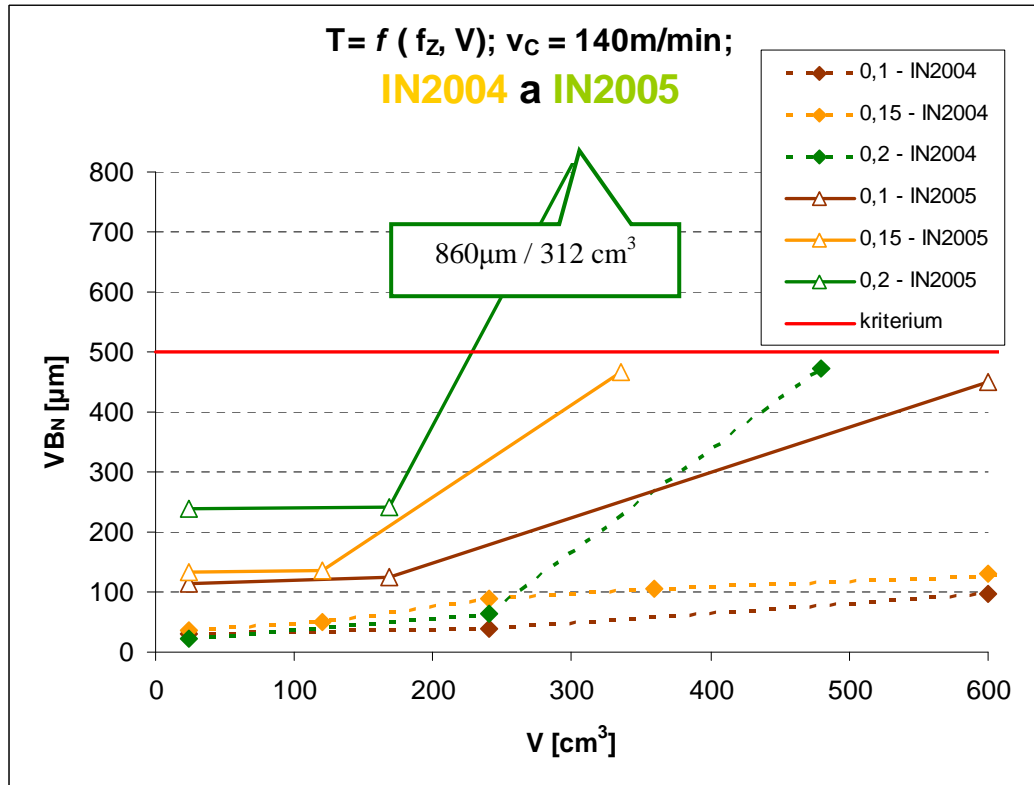
Se vzrůstajícím % Co v materiálu	
roste	klesá
<ul style="list-style-type: none"> ▪ pevnost v ohybu ▪ pevnost v tahu ▪ vrubová houževnatost ▪ únavová pevnost (mírně) ▪ koeficient délkové roztažnosti 	<ul style="list-style-type: none"> • měrná hmotnost • tvrdost • relativní odolnost vůči abrazi • modul pružnosti v tahu • modul pružnosti ve smyku • pevnost v tlaku

Tab.8-4 Vliv vzrůstajícího obsahu Co na vlastnosti slinutého karbidu [69]

Druhý podstatný rozdíl mezi IN2004 a IN2005 je v jejich mikrogeometrii, přesněji řečeno v poloměru zaoblení ostří. V případě IN2004 je hodnota $r_N \approx 16\mu\text{m}$ a v případě IN2005 $r_N \approx 21\mu\text{m}$. Jak již bylo uvedeno (**kap.8.1.2**), je znám vliv poloměru zaoblení ostří r_N na trvanlivosti nástroje **T**. Obecně platí, že menší poloměr zaoblení ostří r_N znamená vyšší trvanlivost nástroje. Tato hodnota se ale musí pohybovat v určitém intervalu, neboť příliš malý poloměr zaoblení ostří r_N nezaručuje vyšší trvanlivost **T** (viz **obr. 8-3, kap.8.1.2**). Dá se předpokládat, že IN2004 je blíže ideálním hodnotám než IN2005.

Kombinace vlivu chemického složení a mikrogeometrie nástroje znamená, že IN2005 je méně odolnější vůči opotřebení než IN2004. Opotřebení ve tvaru vrubu má nejčastěji mechanické příčiny [17]. Toto opotřebení vznikalo u obou VBD v místě maximální hloubky řezu. Korozi vzdorné oceli mají všeobecně větší sklon k deformačnímu zpevnování obrobeneho povrchu [17,18,19]. V tomto případě se navíc jedná o feriticko-martenzitickou ocel, která má nehomogenní strukturu tvořenou měkkým feritem a tvrdým martenzitem. Částičky martenzitu mohou působit jako abrazivum a proto dochází k opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě VBD [17]. V místě vrubu se do řezu dostává kyslík, který navíc způsobuje oxidaci.

V průběhu dalšího experimentálního studia byl sledován vliv použité VBD a různých řezných podmínek na zpevnění obrobeného povrchu. Bylo zjištěno, že obrobený povrch se v případě IN2005 zpevňuje do větší hloubky oproti povrchu, obrobenému pomocí IN2004. Deformovaná vrstva se navíc zvětšuje se zvyšující se řeznou rychlostí. Opatření ve tvaru vrubu vzniká právě vlivem zpevněné povrchové vrstvy obrobku. Více o zpevňování povrchové vrstvy obrobeného povrchu je uvedeno v kapitole 8.2.6.



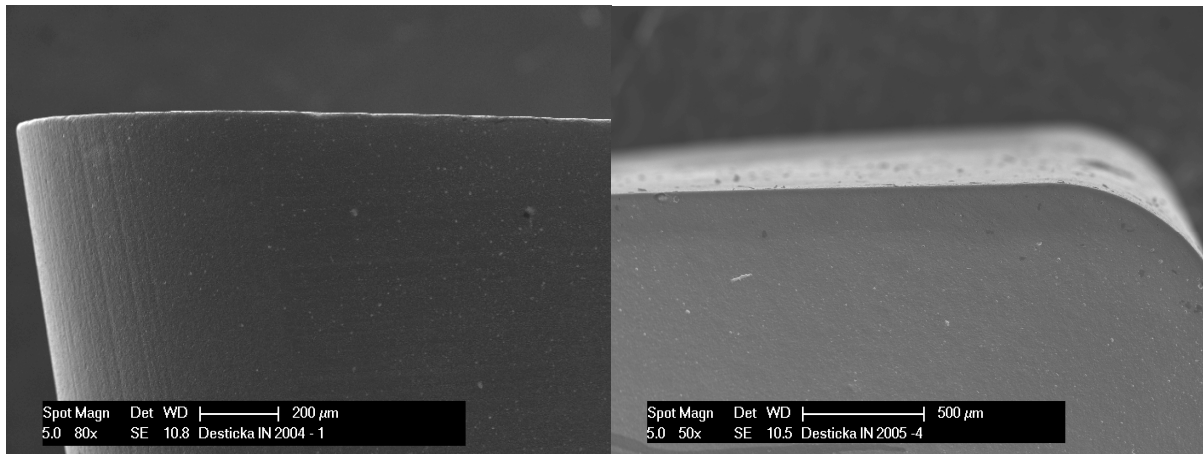
Obr.8-7 Závislost opotřebení řezného nástroje na objemu odebraného materiálu a změně posuvu f_z ; $v_c = 140\text{m/min}$; IN2004 a IN2005

Vliv posuvu na trvanlivost nástroje je jednoznačný. Se zvyšující se hodnotou posuvu f_z se nástroj rychleji opotřebuje, neboť je výrazněji namáhán a tím klesá jeho trvanlivost. Vliv posuvu na trvanlivost pro IN2004 a IN2005 je zobrazen v grafu na obrázku 8-7. Z grafu je patrné, že za daných řezných podmínek je IN2004 daleko odolnější v porovnání s IN2005, neboť IN2004 se opotřebovává méně a pomaleji a hodnota opotřebení pro jednotlivé hodnoty f_z ani nedosáhne hodnot opotřebení dosažených u IN2005.

Ukázka snímků opotřebení v závislosti na změně posuvu f_z pro IN2004 i IN2005 je zobrazena v příloze v kapitole P-4.5 v tabulce P4-4. Snímky v prvním sloupci tabulky odpovídají počátečním bodům křivek a snímky ve třetím sloupci odpovídají konečným bodům křivek průběhů opotřebení.

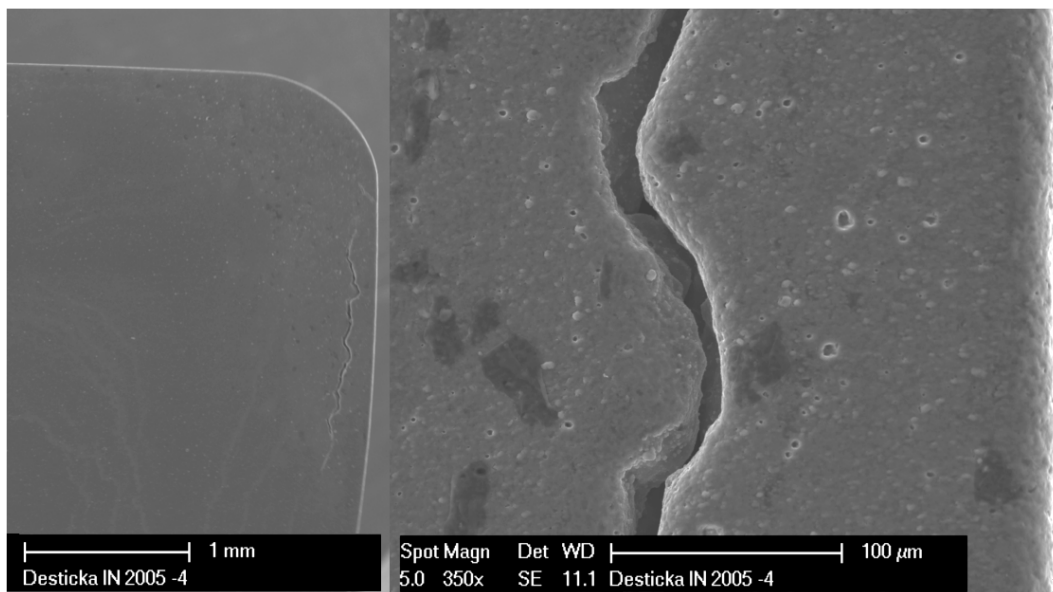
Kontrola stavu řezného břítu

V průběhu experimentálního měření byla provedena kontrola stavu břitů VBD. Namátkou bylo vybráno několik VBD obou typů. Ty byly kontrolovány pomocí elektronového mikroskopu.



Obr.8-8 Hřbet VBD IN2004 (vlevo) a čelo VBD IN2005

Bylo zjištěno, že VBD vykazují běžné drobné poškození povrchu v podobě odštípnutého povlaku. Takové poškození vzniká např. vlivem manipulace, či vlivem zbytkového napětí po depozici. Takovému drobnému poškození nelze úplně zabránit. Bohužel, na VBD IN2005 bylo v jednom případě zjištěno daleko větší poškození. Jednalo se o trhlinu na čele, dlouhou přibližně 1 mm. Trhlina byla rovnoběžná s vedlejším ostřím VBD viz *obr.8-9*.



Obr.8-9 Poškození VBD typu IN2005

Takto poškozená VBD by pravděpodobně v řezu selhala. Je patrné, že poškození vzniklo již během výroby a poukazuje to na nedostatky v kontrole kvality VBD. Ze zjištěných skutečností plyne, že pro všechny experimenty byly VBD podrobeny pečlivé vizuální kontrole.

8.2.2 Drsnost obrobeného povrchu

Drsnost obrobeného povrchu je možno hodnotit pomocí celé řady parametrů. Tyto parametry však mají různou vypovídající hodnotu o stavu povrchu případně o jeho funkčních vlastnostech. Ačkoliv se v dnešní době stále nejčastěji jako parametr pro předepisování drsnosti používá její aritmetická hodnota **R_a** je již známo, že její význam klesá s ohledem na požadavky kladené na užité vlastnosti povrchů. V následující tabulce jsou porovnány významnosti některých parametrů drsnosti obrobeného povrchu v závislosti na fyzikálních/funkčních vlastnostech obrobeného povrchu. Jak je z tabulky patrné, nejvhodnější pro hodnocení obrobeného povrchu z hlediska jeho drsnosti

je kombinace parametrů **Ra**, **Rz** a **Rt**. V této práci jsou tedy sledovány parametry **Ra** a **Rz**. Mezi jednotlivými parametry, zjištěnými pro jeden povrch, neexistuje žádný univerzální přepočet co se jejich hodnot týče *). Je obecně známo, že závislosti pro jednotlivé parametry (Ra, Rz, Rt, atd.) na různých proměnných (např. na objemu odebraného materiálu, řezné rychlosti, opotřebením atd.) jsou velmi podobné či téměř totožné (samozřejmě platí pouze pro jeden sledovaný povrch). To je možné potvrdit porovnáním grafů na obrázcích 8-10 a 8-12 s obrázky P4-9 a P4-10 v příloze (kap.P-4.6).

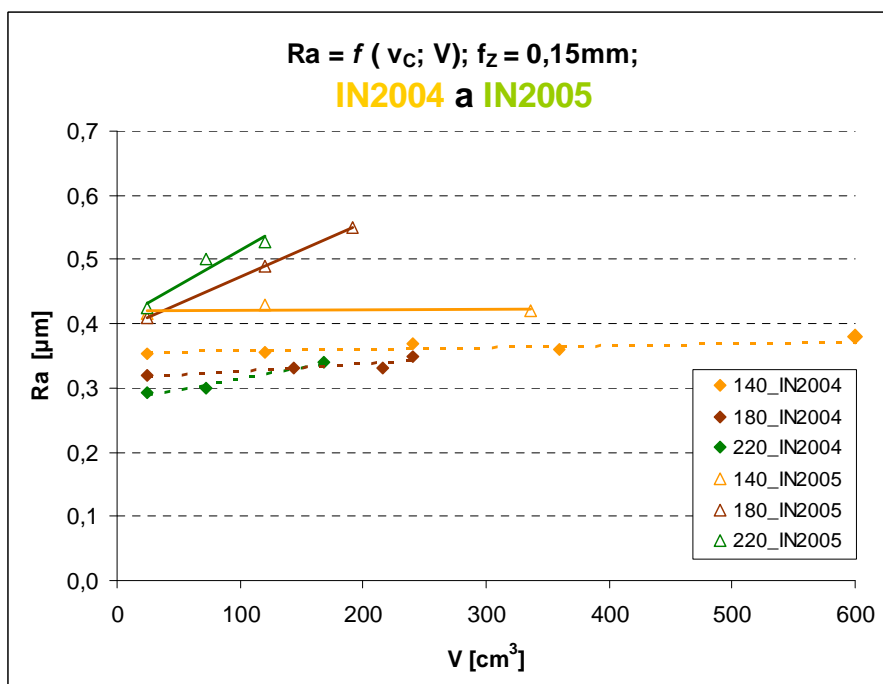
Funkční vlastnosti	Ra, Rq	Rp	Rt, Rz	Rsk	Rku	Rsm	Wa
Kontakt/ „pevnost kontaktu“	*		**	*	*	**	*
Únavová pevnost	*	*	**		*		
Tepelná vodivost	*	**				**	*
Elektrická vodivost	*					*	*
Světelná odrazovost			**				
Tření a opotřebením	*		**	**	**	*	*
Mazání	*	*	**	**	*		**
Mechanické těsnění	*		**	**			**
Únavová koroze	*	*		*		*	
Montážní odchylky	*		**				**

Tab.8-5 Fyzikální/funkční významnost některých parametrů drsnosti povrchu [70] (pozn.: dvě hvězdičky signalizují výrazný vliv)

pozn: *) v [17] se uvádí, že dosahuje-li hodnota Ra hodnot vyšších, než 0,8 μm , může být Rz obecně považována za čtyřikrát větší hodnotu, než Ra. Během experimentálního studia v rámci této práce však hodnota drsnosti obrobeného povrchu vyjádřená pomocí parametru Ra nikdy hodnotu 0,8 μm nepřesáhla.

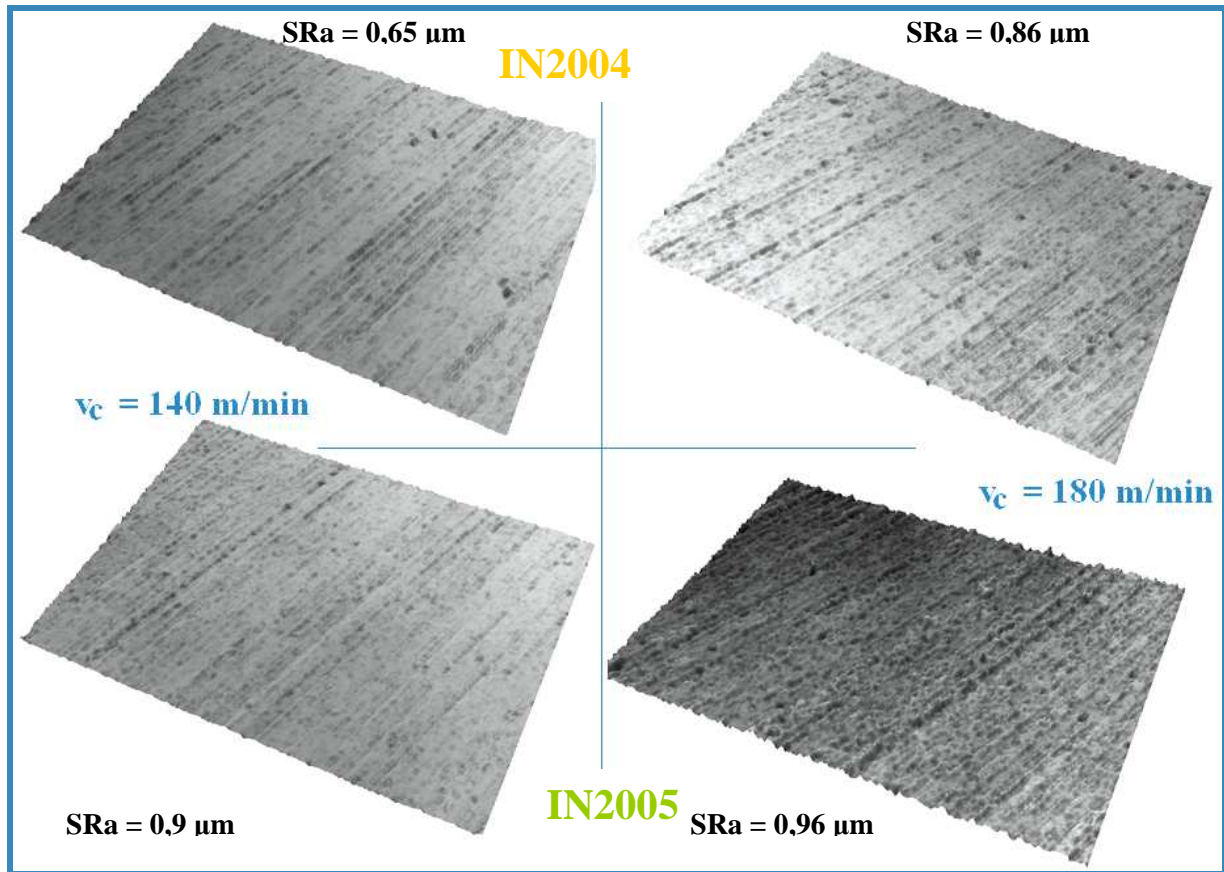
Vliv řezné rychlosti na drsnost obrobeného povrchu je patrný z **obr.8-10**. S VBD typu IN2004 bylo dosaženo celkově lepší drsnosti obrobeného povrchu při všech testovaných řezných rychlostech. Zajímavé je, že zatímco u IN2004 se drsnost obrobeného povrchu zlepšovala se zvyšující se řeznou rychlostí u IN2005 to bylo právě naopak. V případě IN2004 neměl objem odebraného materiálu (opotřebením břitu) na drsnost obrobeného povrchu téměř žádný vliv. Jak je z grafu patrné, drsnost byla konstantní po celou dobu životnosti nástroje. U IN2005 platí totéž pouze u nejnižší řezné rychlosti. Při vyšších řezných rychlostech se drsnost rychle zhoršovala v závislosti na objemu odebraného materiálu.

Drsnost obrobeného povrchu je v první řadě odrazem mikrogeometrie nástroje, zejména vlivu poloměru zaoblení ostří r_N [67]. Proto také již v počátku grafu (**obr.8-10**) je mezi průběhy drsností pro jednotlivé řezné materiály rozdíl přibližně 20 ÷ 25%. Dále se začíná projevovat kombinace vlivů trvanlivosti (opotřebením) a velikosti poloměru zaoblení ostří r_N . (viz **kap.8.2.1**).

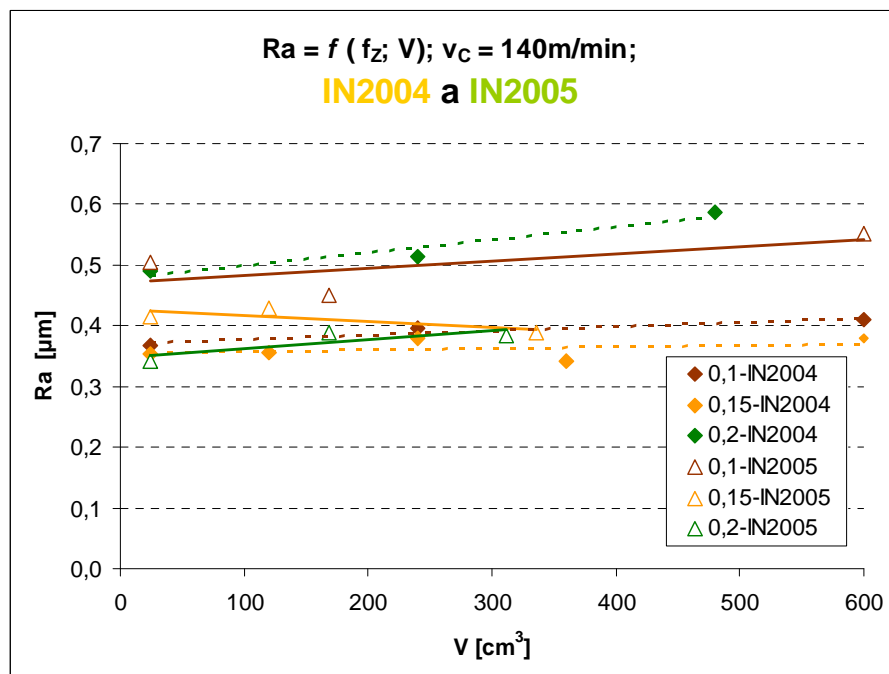


Obr.8-10 Závislost drsnosti obrobeneho povrchu na objemu odebraného materiálu a změně v_c ; $f_z = 0,15$ mm; IN2004 a IN2005

Na *obr.8-11* je provedeno porovnání plošné drsnosti obrobeneho povrchu pro oba materiály, avšak pouze pro 2 hodnoty řezných rychlostí. Provedené porovnání je zde zobrazeno pouze jako doplňující informace. Hodnocení plošné drsnosti je odlišné od klasického profilového měření, proto také uvedené hodnoty **SRa** neodpovídají zjištěným hodnotám **Ra**. Tato metoda hodnocení obrobeneho povrchu je z praktického hlediska vhodnější, neboť popisuje povrch jako celek. Bohužel ještě není tolik rozšířená. Navíc je z hlediska provedeného experimentu nevhodná, neboť ji prozatím není možné realizovat přímo v podmínkách halových laboratoří KTO. Je nutné připravit vzorky obrobeneho povrchu, které jsou poté zvlášť hodnoceny. Tím se značně zvyšuje materiálová náročnost experimentu.



Obr.8-11 Porovnání obrobených povrchů pro IN2004 a IN2005 při různé řezné rychlosti; $f_z = 0,15$ mm/zub



Obr.8-12 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na objemu odebraného materiálu a změně f_z ; $v_c = 140$ m/min; IN2004 a IN2005

8.2.3 Celkové silové zatížení nástroje

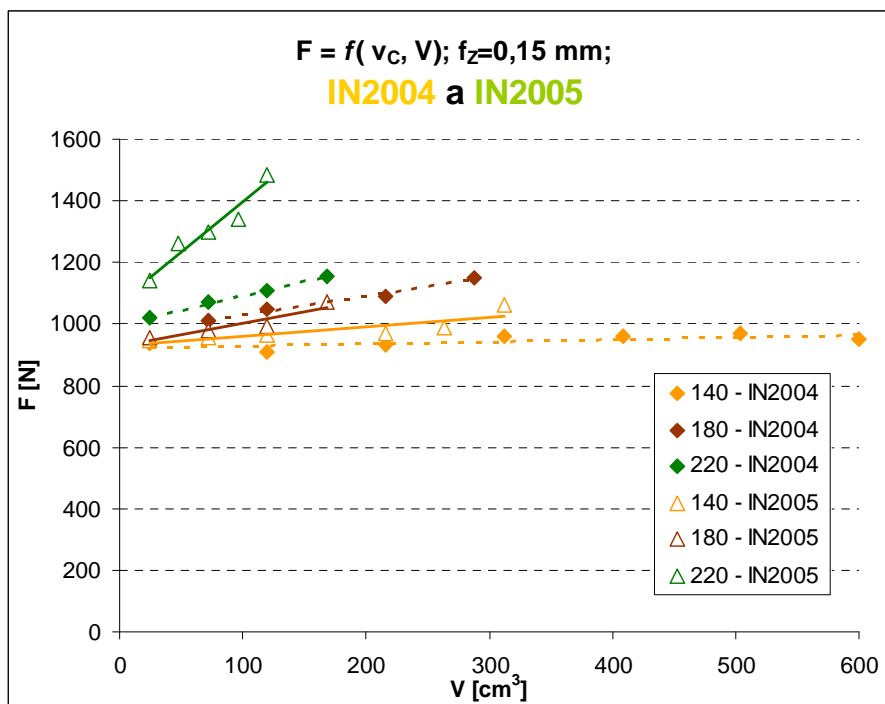
Velikost řezných sil ovlivňuje nejen trvanlivost, ale i spolehlivost a produktivitu, a také v celkovém hodnocení provozu stroje např. i trvanlivost vřetena. Čím méně je nástroj zatížen, tím méně

je vřeteno namáháno a tím méně potřebuje stroj příkonu obrábění. To se v celkovém součtu projeví v provozních nákladech. Proto je zpravidla žádoucí používat takové nástroje a takové řezné podmínky, které vykazují co možná nejnižší zatížení vřetena a tedy vyvozují nejnižší řezné síly [79]. Hodnocení silového zatížení nástroje je v práci provedeno sledováním celkového silového zatížení nástroje F . Tato hodnota F je výslednicí hodnot naměřených během experimentálního obrábění.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad [N] \quad (R-1)$$

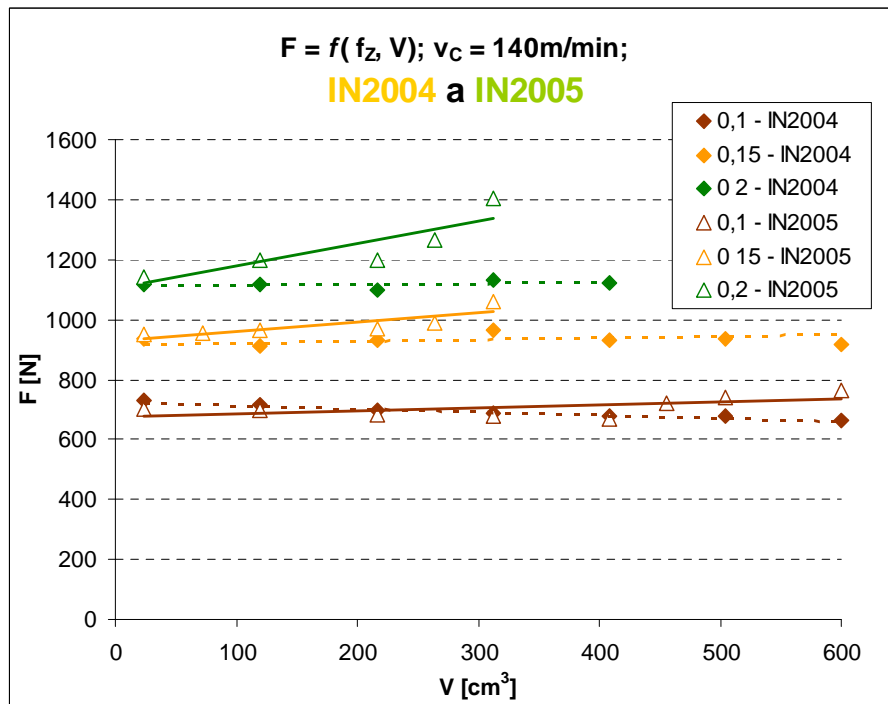
kde: F celkové silové zatížení [N]
 $F_{x,y,z}$ složky řezné síly měřené v osách x,y,z [N]

Z krátkodobého hlediska může dojít k situaci, že dochází ke snížení řezných sil v závislosti na zvětšujícím se opotřebením, např. ve chvíli kdy dojde k poškození povlaku a odkryje se tím „nová“, ostřejší řezná hrana. To ovšem znamená, že se zmenší hloubka řezu, resp. tloušťka třísky. Z hlediska stability řezu má zvětšující se opotřebením negativní vliv na silové zatížení řezného procesu. Proto řezné síly rostou v závislosti se zvětšujícím se objemem odebraného materiálu. Objem odebraného materiálu je přímo závislý na trvanlivosti, resp. na opotřebením. Nejméně a nejpomaleji se opotřebovávala VBD IN2004 při $v_c = 140$ m/min a $f_z = 0,15$ mm. Tomu také odpovídá silové zatížení, které v průběhu testování nepřesáhlo hodnotu 1000N (viz *obr. 8-13*)



Obr.8-13 Závislost celkového silového zatížení F na objemu odebraného materiálu a změně v_c ; $f_z = 0,15$ mm; IN2004 a IN2005

Vliv řezné rychlosti v_c na F je také patrný. Z vyšší řeznou rychlostí se zvyšuje intenzita opotřebením a tím se zvyšuje silové zatížení. To platí pro oba řezné materiály. Ze získaných výsledků byla stanovena závislost celkového zatížení na měnících se řezných podmínkách – v_c a f_z . Tato oblast je obsahem kapitoly 8.2.5.

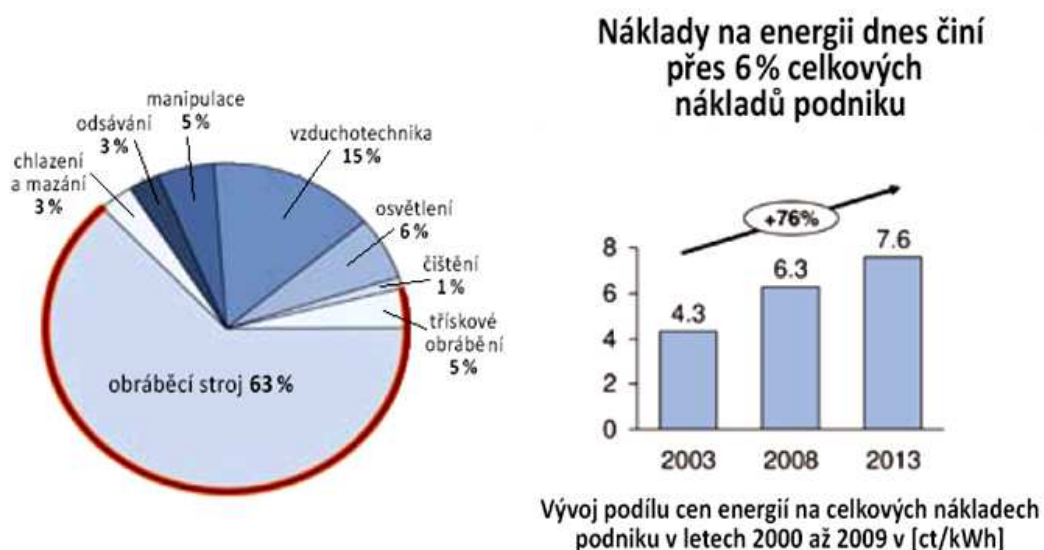


Obr.8-14 Závislost celkového silového zatížení F na objemu odebraného materiálu a změně f_z ; $v_c = 140 \text{ m/min}$; IN2004 a IN2005

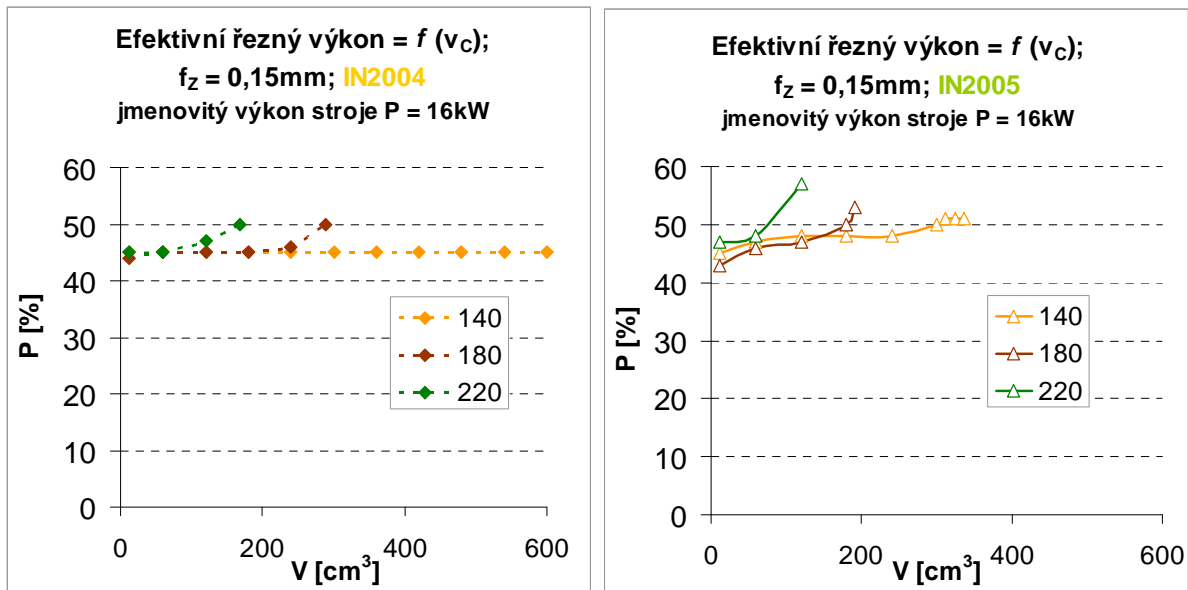
Vliv posuvu f_z na velikost silového zatížení je jednoznačný. Ze zvyšujícím se posuvem f_z narůstá silové zatížení. To je způsobeno tím, že se zvyšujícím se posuvem se zvětšuje průřez odřezávané vrstvy. V případě IN2004 je silové zatížení nástroje závislé spíše jen na samotné velikosti posuvu a je téměř konstantní po celou dobu trvanlivosti. U IN2005 se však také projevuje vliv opotřebení, kdy při vyšších hodnotách posuvu dochází k výraznějšímu nárůstu zatížení nástroje v závislosti na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu V .

8.2.4 Efektivní řezný výkon

V dnešní době začínají hrát důležitou roli také ekologické aspekty výroby. Energetickou náročnost je možné ovlivnit správnou volbou technologických podmínek výrobního procesu. Výkon potřebný pro realizaci řezného procesu je přímo úměrný spotřebované energii.

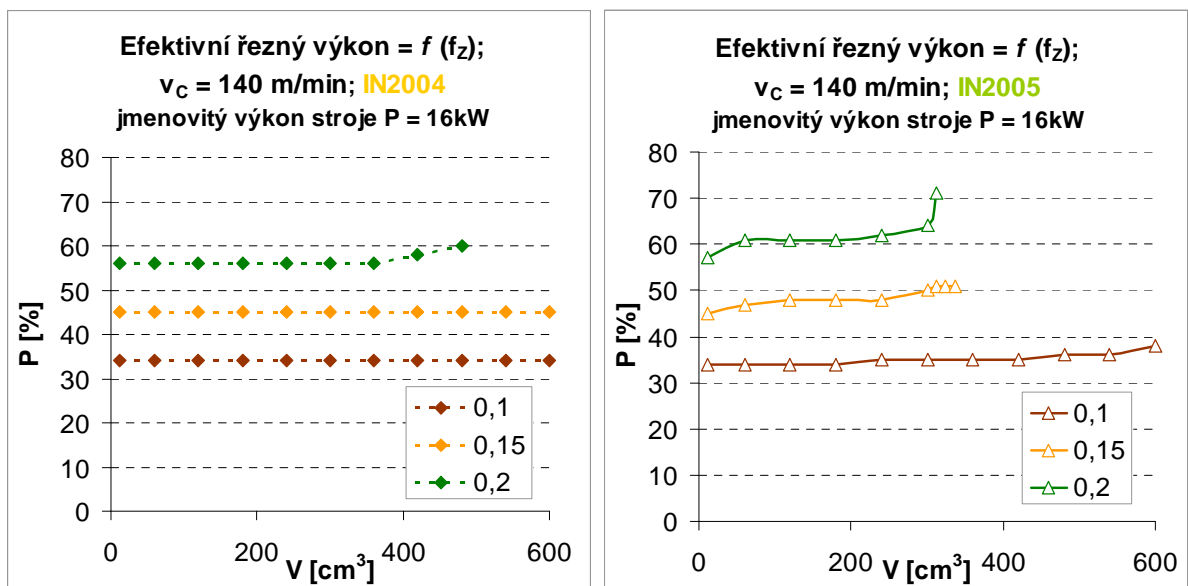


Obr.8-15 Spotřeba energie vs. výrobní náklady [71]



Obr.8-16 Efektivní řezný výkon v závislosti na objemu odebraného materiálu a změně řezné rychlosti v_c ; $f_z = 0,15$ mm; IN2004 a IN2005

Efektivní řezný výkon se zvyšuje v závislosti na zvětšujícím se objemu odebraného materiálu. Tento nárůst je intenzivnější se zvyšující se řeznou rychlostí. To odpovídá zjištěným průběhům opotřebení. Zvyšující se řezná rychlost má negativní vliv na opotřebení a to způsobuje nárůst silového zatížení nástroje. Nárůst silového zatížení má za následek zvýšení efektivního řezného výkonu na vřetení .



Obr.8-17 Efektivní řezný výkon v závislosti na objemu odebraného materiálu a změně posuvu f_z ; $v_c = 140$ mm; IN2004 a IN2005

Závislost efektivního řezného výkonu stroje na změně posuvu f_z je značná. Pro oba typy VBD platí, že čím je vyšší hodnota posuvu f_z , tím je vyšší efektivní výkon. Jak je z grafů patrné, zvětšení posuvu f_z o 0,05mm znamená zvýšení výkonu o 10% (platí pouze za testovaných řezných podmínek). Navíc, IN2005 je při vyšších hodnotách posuvu f_z přibližně o 5% výkonově náročnější v porovnání s IN2004.

8.2.5 Vliv řezných podmínek na velikost silového zatížení

Při sledování silového zatížení je možné měřit hodnoty kontinuálně v průběhu celého experimentálního obrábění. Obrobek je pevně upnut na dynamometru. Díky tomu je možné stanovit závislosti velikosti složek sil na řezných podmínkách. V případě experimentu se jedná o závislost celkového zatížení nástroje F na změně posuvu frézy f_Z , řezné rychlosti v_C a objemu odebraného materiálu V . Celkové zatížení bylo získáno z naměřených složek pomocí vztahu uvedeného v rovnici (**R-1**), *kap.8.2.3*

Jak se zvyšující se řeznou rychlostí v_C , tak také se zvyšujícím se posuvem f_Z velikost celkového zatížení roste. Proto byly zvoleny níže uvedené tvary funkcí, viz vztahy: **R-3** pro v_C a **R-4** pro f_Z .

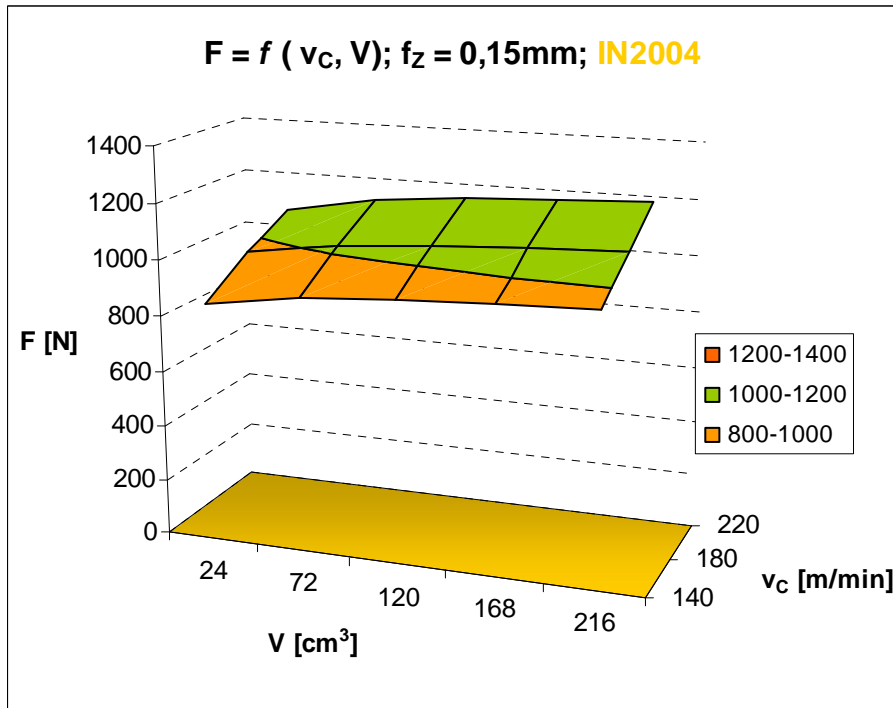
$$F = c_F \cdot v_C^{n_F} \cdot V^{y_F} [N] \quad (\text{R-3})$$

kde: F celkové silové zatížení [N]
 v_C řezná rychlost [m/min]
 V objem odebraného materiálu [cm³]
 c_F konstanta funkce [-]
 n_F, y_F exponenty funkce [-]

$$F = c_F \cdot f_Z^{n_F} \cdot V^{y_F} [N] \quad (\text{R-4})$$

kde: F celkové silové zatížení [N]
 f_Z posuv na zub [mm]
 V objem odebraného materiálu [cm³]
 c_F konstanta funkce [-]
 n_F, y_F exponenty funkce [-]

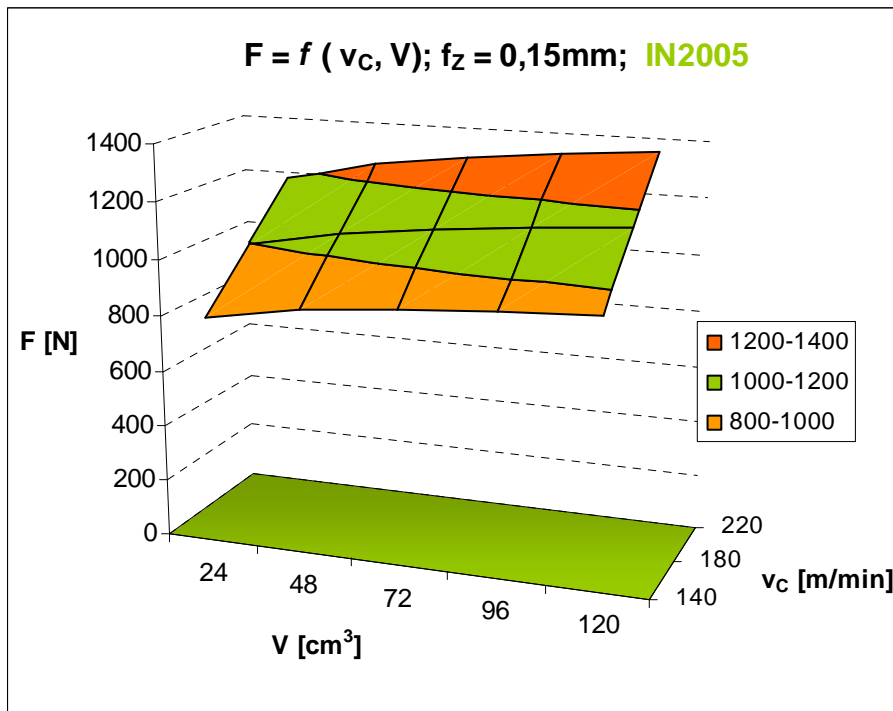
Grafické znázornění závislosti velikosti celkového silového zatížení F na změně řezné rychlosti v_C a objemu odebraného materiálu V je pro IN2004 na *obr.8-19* a pro IN2005 na *obr.8-20*. Zjištěné závislosti jsou vyjádřeny pomocí rovnic **R-5** a **R-6**. Z porovnání obou grafů vychází, že změna řezné rychlosti v_C má výraznější vliv na F u IN2005. Zvýšením v_C ze 140 m/min na 220 m/min znamená nárůst silového zatížení téměř o 50%. V případě IN2004 je to přibližně o 25%. Tento výraznější vliv změny řezné rychlosti v_C na F pro IN2005 je patrný také z porovnání samotných exponentů pro v_C . Tyto zjištěné průběhy jsou způsobeny vlivem řezné rychlosti v_C na trvanlivost nástroje, čili na velikost opotřebení. Při vyšších řezných rychlostech se nástroje rychleji opotřebovávají. Opotřebení má negativní vliv na velikost jednotlivých složek řezných sil a tím také na celkové zatížení břitu nástroje.



Obr.8-19 Závislost celkového silového zatížení F na řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu pro IN2004; $f_z = 0,15$ mm

$$F_{IN2004} = 74 \cdot v_c^{0,4658} \cdot V^{0,0483} [N] \quad (R-5)$$

Výsledky statistické analýzy a vyrovnání závislostí celkového silového zatížení F pro IN2004 při změně v_c jsou uvedeny v příloze v kapitole **P-4.7** v tab.**P4-5**.



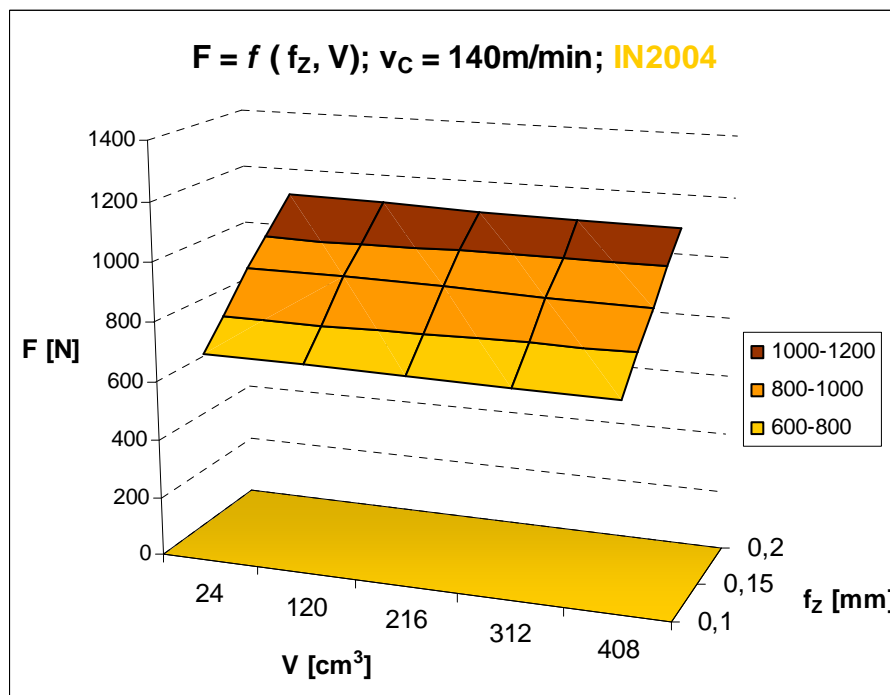
Obr.8-20 Závislost celkového silového zatížení F na řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu pro IN2005; $f_z = 0,15$ mm

$$F_{IN2005} = 11 \cdot v_C^{0,8139} \cdot V^{0,0898} [N] \quad (R-6)$$

Výsledky statistické analýzy a vyrovnání závislostí celkového silového zatížení F pro IN2005 při změně v_C jsou uvedeny v příloze v kapitole **P-4.7** v tab.**P4-6**.

Vliv posuvu f_z na celkové silové zatížení

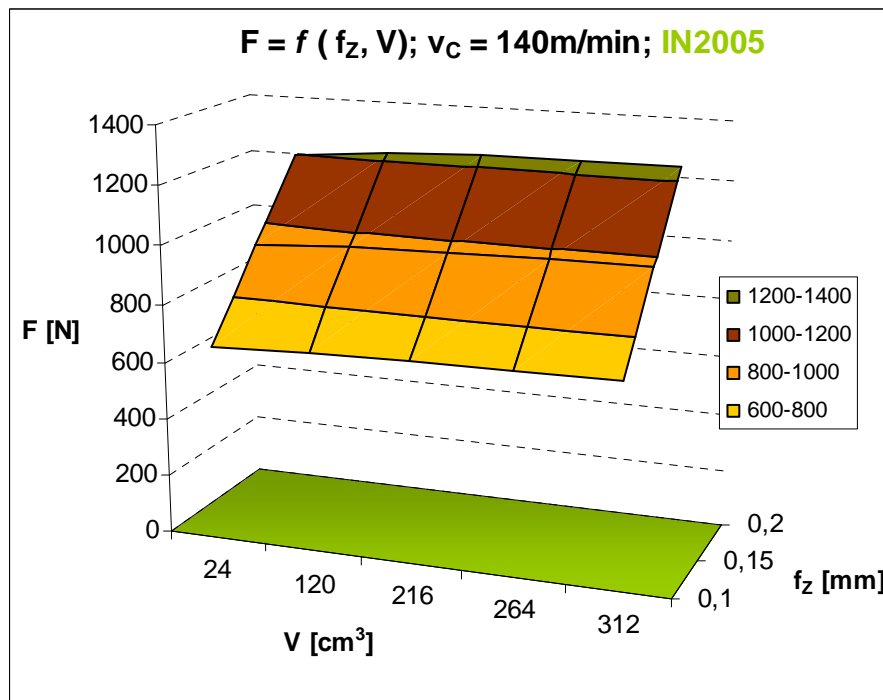
Grafické znázornění závislosti celkového silového zatížení F na změně posuvu f_z a objemu odebraného materiálu V je pro IN2004 na **obr.8-21** a pro IN2005 na **obr.8-22**. Zjištěné závislosti jsou vyjádřeny pomocí rovnic **R-7** a **R-8**. Vliv posuvu f_z na velikost F je pro oba řezné materiály obdobný. Se zvětšující se hodnotou posuvu f_z se zvětšuje průřez odřezávané vrstvy a s tím také velikost celkového silového zatížení. V případě IN2005 je tento nárůst výraznější. To je opět důsledkem zvyšujícího se opotřebení břitu při vyšších hodnotách posuvu f_z .



Obr.8-21 Závislost celkového silového zatížení F na posuvu f_z a objemu odebraného materiálu pro IN2004; $v_C = 140$ m/min

$$F_{IN2004} = 3376 \cdot f_z^{0,6463} \cdot V^{-0,0153} [N] \quad (R-7)$$

Výsledky statistické analýzy a vyrovnání závislostí celkového silového zatížení F pro IN2004 při změně f_z jsou uvedeny v příloze v kapitole **P-4.7** v tab.**P4-7**.



Obr.8-22 Závislost celkového silového zatížení **F** na posuvu f_z a objemu odebraného materiálu pro IN2005; $v_c = 140$ m/min

$$F_{IN2005} = 4370 \cdot f_z^{0,8371} \cdot V^{0,0136} [N] \quad (R-8)$$

Výsledky statistické analýzy a vyrovnání závislostí celkové řezné síly **F** pro IN2005 při změně f_z jsou uvedeny v příloze v kapitole **P-4.7** v **tab.P4-8**.

8.2.6 Zpevnění obrobeného povrchu

Velmi důležitou vlastností obrobeného povrchu, kterou je vhodné při obrábění sledovat, je jeho zpevňování. Na zpevňování má vliv celá řada parametrů. Můžou to být jak řezné podmínky, tak vlastnosti řezného nástroje. Zpevnění se dá vyjádřit změnou tvrdosti obrobeného povrchu, zjišťované v závislosti na měnící se hloubce od obrobeného povrchu. Také lze sledovat velikost deformované vrstvy jejím měřením na příčných metalografických výbrusech.

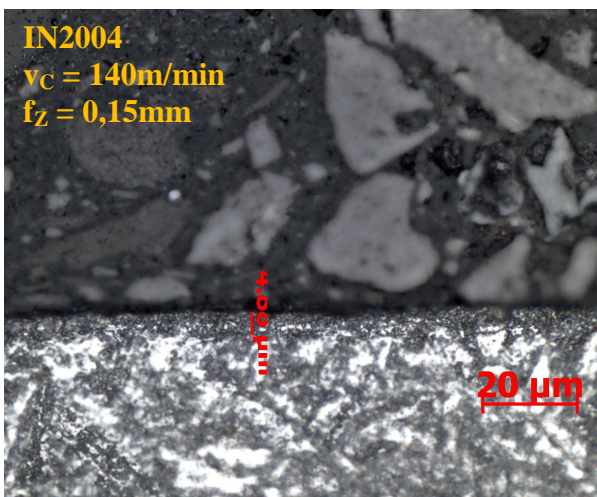
Zpevněná vrstva může mít negativní vliv na samotné obrábění, kdy zpevnění obráběného povrchu vzniklé předchozí operací může výrazně ovlivnit výsledky následující operace.

Z důvodu materiálové a časové náročnosti přípravy vzorků byl vliv obrábění na velikost deformované vrstvy obrobeného povrchu při předdokončování sledován pouze za některých řezných podmínek. Velikost deformace byla sledována v závěru této části experimentu, proto byl sledován pouze vliv favorizovaných řezných podmínek.

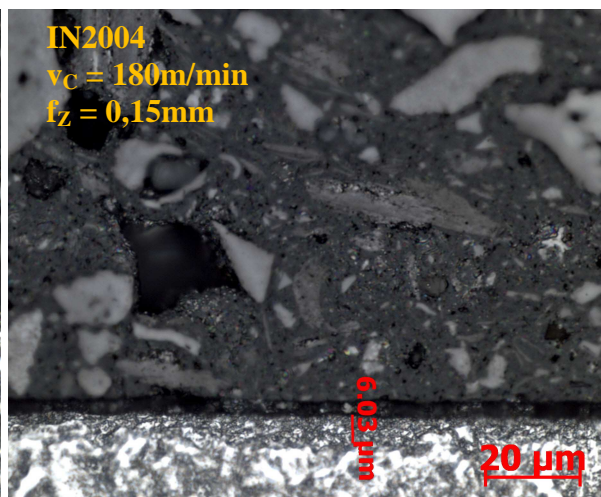
Pro obrábění korozivzdorných ocelí platí, že jsou značně náchylné na mechanické zpevňování obrobeného povrchu. Také v tomto případě docházelo ke vzniku deformované vrstvy na povrchu obrobku. Avšak velikost deformované vrstvy nedosáhla takových hodnot, aby mohlo být provedeno měření tvrdosti. Zpevnění obrobeného povrchu v závislosti na použitém řezném materiálu a změně řezných podmínek bylo hodnoceno pouze měřením hloubky této vrstvy na snímcích z metalografických výbrusů.

Na obrázcích **8-23** a **8-24** jsou zobrazeny snímky povrchových vrstev po obrábění nástrojem s VBD typu IN2004. Rozdíl je zde pouze ve změně řezné rychlosti. V případě řezné rychlosti $v_c = 140$ m/min je hloubka deformované vrstvy $4\mu\text{m}$. V případě řezné rychlosti $v_c = 180$ m/min

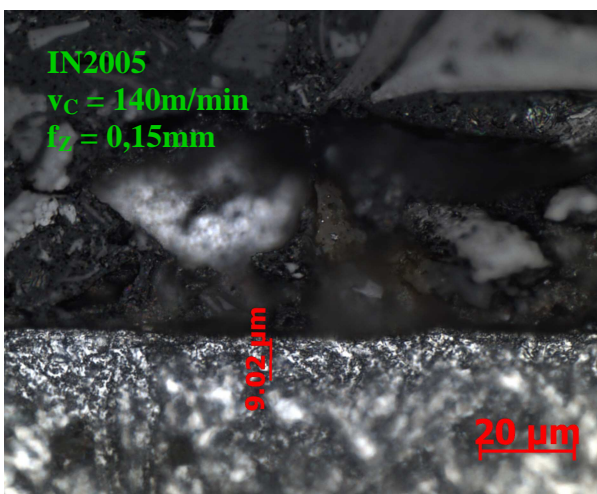
je hloubka deformované vrstvy 6 μm . V porovnání s IN2005 je tento rozdíl zanedbatelný. Na obrázcích 8-25 a 8-26 jsou snímky povrchové vrstvy po obrábění nástrojem s VBD typu IN2005. Porovnáním těchto snímků pro jednotlivé typy řezných materiálů zjistíme, že v případě VBD typu IN2005 je hloubka deformované vrstvy více než dvojnásobná oproti povrchu, který byl za stejných podmínek obroběn VBD typu IN2004. Tento rozdíl je tedy pravděpodobně důsledkem rozdílné mikrogeometrie VBD, zejména vlivem poloměru zaoblení ostří r_N . Zpevnění povrchové vrstvy je primárně způsobováno intenzitou terciární plastické deformace. Nicméně také oblast primárních plastických deformací často zasahuje pod úroveň budoucího povrchu [72]. Tento jev souvisí se skutečností, že reálné ostří není nikdy tvořeno úsečkou, ale je částí válcové plochy o poloměru zaoblení r_N . V bezprostřední interakci břitu s materiálem obrobku se realizuje negativní úhel čela i úhel řezu (δ_{OB}) a budoucí povrch obrobenej plochy nevzniká pouze řezáním, ale i tvářením. Čím větší je poloměr zaoblení ostří r_N , tím větší je zmiňovaný negativní úhel čela a tím větší je oblast primární plastické deformace zasahující do oblasti obrobenej povrchu [72]. VBD typu IN2004 má poloměr zaoblení ostří přibližně $r_N \approx 16 \mu\text{m}$, zatímco IN2005 má $r_N \approx 21 \mu\text{m}$. Z hlediska hloubky zpevnění obrobenej povrchu je tedy vhodnější co nejmenší poloměr zaoblení ostří, v tomto případě VBD typu IN2004.



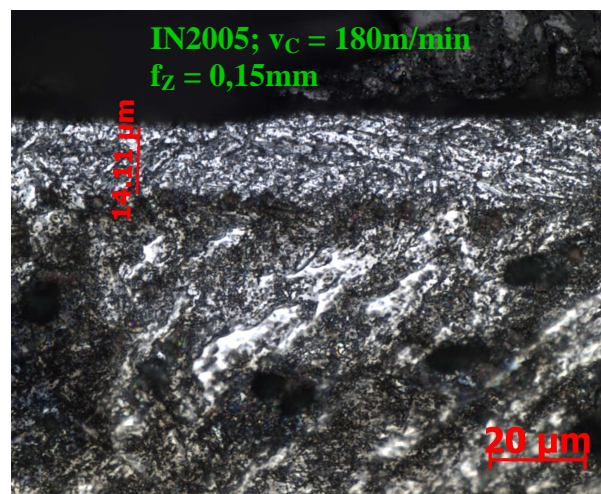
Obr.8-23 Zpevněná vrstva obrobenej povrchu;
 $v_c = 140\text{m/min}$; $f_z = 0,15 \text{ mm}$; IN2004



Obr.8-24 Zpevněná vrstva obrobenej povrchu; $v_c = 180 \text{ m/min}$; $f_z = 0,15 \text{ mm}$; IN2004



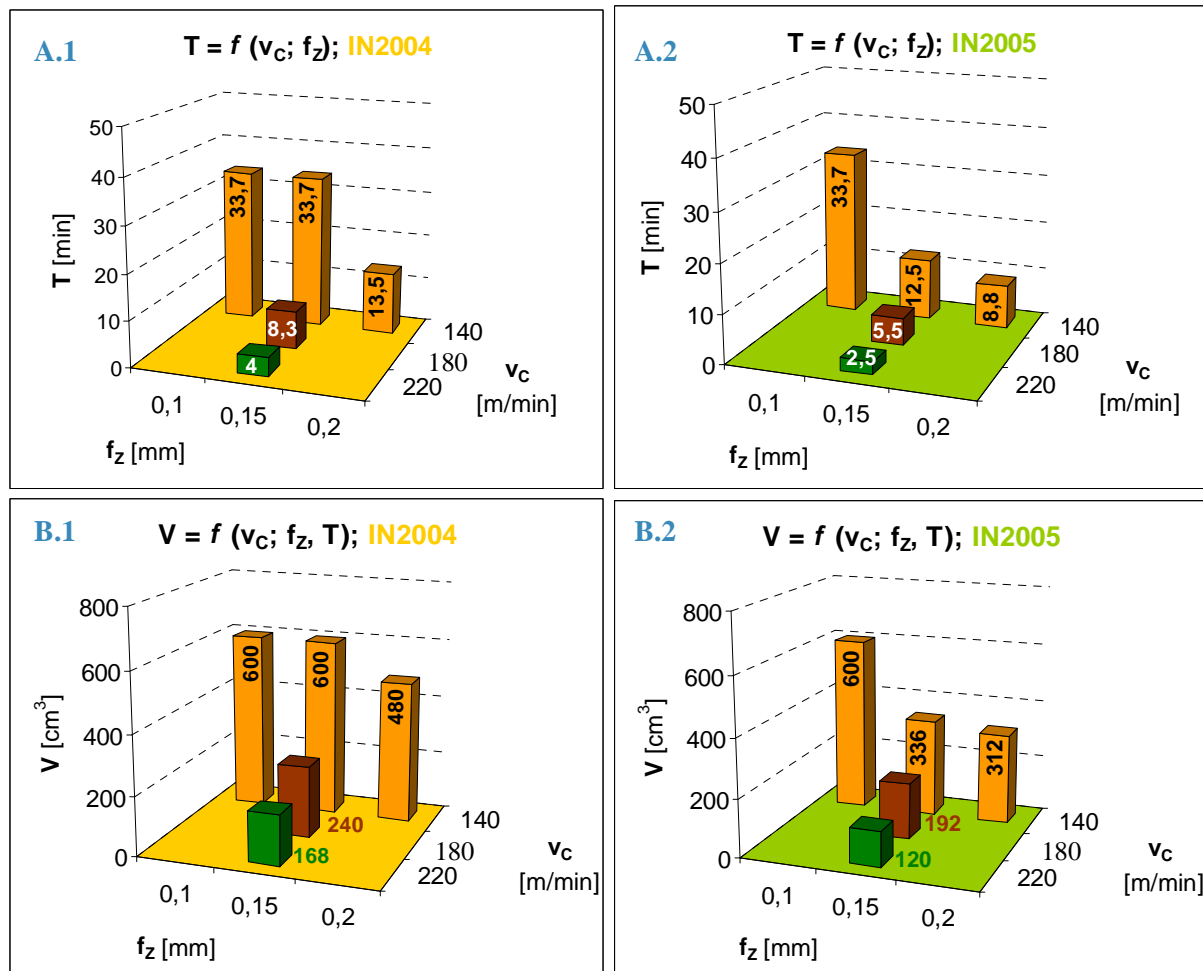
Obr.8-25 Zpevněná vrstva obrobenej povrchu;
 $v_c = 140\text{m/min}$; $f_z = 0,15 \text{ mm}$; IN2005



Obr.8-26 Zpevněná vrstva obrobenej povrchu;
 $v_c = 180\text{m/min}$; $f_z = 0,15 \text{ mm}$; IN2005

8.3 Závěr fáze před-dokončovacého obrábění

Dle výsledků pre-experimentu (*kap.8.1*) se jako největší favorité ukázaly karbidy typu IN2004 a IN2005. Ty byly dále podrobeny rozsáhlejšímu testování. Byla provedena celá řada experimentálních měření za účelem vybrat nejvhodnější materiál a řezné podmínky pro obrábění oceli P91. Celkové porovnání dosažených výsledků je zobrazeno v grafech na *obr.8-27*.



Obr.8-27 Vliv řezných podmínek na trvanlivost (A) a objem odebraného materiálu (B) pro IN2004 (1) a IN2005 (2)

Ve fázi před-dokončovacého obrábění je nejdůležitějším kritériem trvanlivost nástroje. Ta totiž nejvíce ovlivňuje produktivitu obrábění. Po fázi předdokončovací následuje ještě fáze dokončovací. Dokončovací obrábění bývá poslední fází ve výrobním řetězci a finální stav obrobeného povrchu je výsledkem právě této fáze. Proto je také vhodné sledovat stav obrobeného povrchu i během fáze předdokončovací, zejména zpevňování povrchových vrstev. Významné ovlivnění může v horších případech negativně ovlivnit celý řezný proces ve fázi dokončovacého obrábění. Z hlediska trvanlivosti (*kapitola 8.2.1*) bylo celkově lepších výsledků dosaženo s IN2004. To platí zejména za nižších hodnot sledovaných řezných podmínek. Velikost řezné rychlosti v_c by měla být volena z intervalu $v_c = 140 \div 180$ m/min a hodnota posuvu f_z z intervalu $f_z = 0,1 \div 0,15$ mm. Má-li být dosaženo co možná nejvyšší produktivity obrábění, je vhodné volit vyšší hodnoty z obou intervalů. V případě IN2005 bylo z hlediska trvanlivosti dosaženo stejných výsledků jako u IN2004 pouze v jediném případě, a to při $v_c = 140$ m/min a $f_z = 0,1$ mm. Při ostatních testovaných řezných podmínkách byl tento karbid horší. Ostatní sledované charakteristiky řezného procesu jsou přímo závislé na trvanlivosti čili opotřebením, takže při jejich vzájemném porovnávání dochází ke stejným závěrům jako v případě trvanlivosti. Z hlediska celkového silového zatížení (*kapitola 8.2.3*) lze říci, že v oblasti dané intervalem řezné rychlosti $v_c = 140 \div 180$ m/min a intervalem posuvu

$f_z = 0,1 \div 0,15$ mm se oba karbidy chovají velmi podobně. Pokud by ale mělo být kritériem volby řezných podmínek pouze celkové silové zatížení, bylo vhodné volit spíše nižší hodnoty řezných podmínek a VBD IN2004. Co se efektivního řezného výkonu týče (kapitola 8.2.4), je favoritem IN2004. Velikost řezné rychlosti v_c nemá na efektivní řezný výkon významný vliv. Výrazný vliv má ale hodnota posuvu. Zde je nejvhodnější volit nižší hodnoty.

Z experimentálních výsledků byla vytvořena následující tabulka. V té je provedeno porovnání dosažených výsledků za daných řezných podmínek s jejich bodovým ohodnocením. Jednotlivé sledované parametry byly obodovány stupnicí bodů, jejíž rozsah odpovídá důležitosti sledovaného parametru. Čím více bodů, tím lepší výsledky. Většině sledovaných parametrů byl přiřazen rozsah bodů od 1 do 10. Pouze u drsnosti byl tento rozsah snížen na interval od 0,5 do 5, neboť drsnost obrobeného povrchu nehraje ve fázi předdokončování takovou roli, jako například trvanlivost či produktivita. Jednotlivé přiřazení bodů je spíše subjektivní záležitostí. V porovnání s dosaženými výsledky vyplývajícími z jednotlivých kapitol je však reálné a vyhovuje zjištěným skutečnostem.

$f_z = 0,1-0,2$ mm; $v_c = 140-220$ m/min	IN2004					IN2005				
	0,1	0,15			0,2	0,1	0,15			0,2
		140	180	220			140	180	220	
Trvanlivost (1-10)	10	10	6	3	8	10	8	4	3	6
Drsnost (0,5-5)	4	5	5	5	1,5	2	4	3	3	3
Celk.zatížení F (1-10)	10	9	7	6	6	10	8	7	4	5
Efekt. řez. výkon (1-10)	10	8	9	8	6	10	8	7	6	5
Produktivita (1-10)	2	6	8	10	9	2	6	8	10	9
Σ	36	38	35	32	30,5	34	34	29	26	28
Pořadí	2	1	3	6	7	4-5	4-5	8	10	9

Tab.8-6 Hodnocení dosažených výsledků

Pro obrábění oceli P91 v oblasti předdokončovacího frézování lze doporučit karbid typu IN2004 při řezné rychlosti $v_c = 140 \div 180$ m/min a posuvu $f_z = 0,1 \div 0,15$ mm.

V celkovém hodnocení nebylo zohledněno pouze zpevnění povrchové vrstvy. To proto, že sledování této charakteristiky bylo provedeno až v závěru této části experimentu. Z důvodu časové a materiálové náročnosti bylo toto sledováno pouze u těch řezných podmínek, které se v průběhu vyhodnocování projeví jako nejvhodnější pro obrábění oceli P91, tedy $v_c = 140$ a 180 m/min a $f_z = 0,15$ mm. Také z tohoto hlediska se jako vhodnější volba potvrdil karbid typu IN2004.

Výsledky experimentálního studia ve fázi předdokončovacího frézování oceli P91 odpovídají charakteru konkrétních požadavků na obrábění oceli P91, z kterých tato práce vychází. Pro všeobecné uplatnění dosažených výsledků bude vhodná další rozvaha, která může zohlednit jiný charakter výroby či odlišné požadavky na obrábění, a výsledkem může být doporučení jiné kombinace technologických podmínek.

9 DOKONČOVÁNÍ

Dokončování („finishing“) bývá nejčastěji poslední fází ve výrobním řetězci z pohledu strojírenské technologie obrábění. V této fázi bývá odebráno zbývajících méně než 10% materiálu přídavek. Po dokončovací operaci již většinou nenásleduje žádná další operace. Proto je také na tuto fázi výroby kladeno mnoho požadavků. Zejména na jakost obrobeného povrchu, neboť obrobený povrch je povrchem finálním. To platí obzvlášť v případech, kdy obrobený povrch je povrchem funkčním. Základní úkoly této fáze jsou :

- 1) odebrat zbývajcí přídavek;
- 2) odstranit stopy po předdokončování;
- 3) dosáhnout stanovené jakosti obrobeného povrchu.

Oproti fázi před-dokončovací zde nestačí jako rozhodující kritérium pro volbu vhodných technologických podmínek (nástroj, řezný materiál, řezné podmínky) pouze trvanlivost řezného nástroje, ale také jakost obrobeného povrchu.

Úkolem této části experimentální činnosti je:

- 1) volba vhodné VBD;
- 2) stanovení kombinace řezných podmínek, splňujících požadavky kladené na tuto fázi obrábění, zejména s ohledem na jakost obrobené plochy a hospodárnost výroby;
- 3) popsat problematiku frézování oceli P91 ve fázi dokončovací.

Řešení je tedy navrženo tak, aby jeho výstupy, spolu s výstupy z předchozí části experimentálního studia (před-dokončovací obrábění) splnily stanovené cíle této práce.

Experimentální studium bylo rozděleno na dvě části. První z nich byl tzv. pre-experiment (*kap.9.1*), pak následoval experiment (*kap.9.2*). Úkolem pre-experimentu bylo vybrat ze skupiny 8 zvolených a doporučených VBD 2 až 3 druhy nejvhodnějších VBD, které byly v rámci samotného experimentu hlouběji testovány.

9.1 PRE-EXPERIMENT

V rámci pre-experimentu byla stanovena dvě kritéria. Jednalo se o trvanlivost nástroje, kde byla stanovena hodnota kritériálního opotřebení $VB_B/VB_N = 0,2$ mm a dosažená hodnota drsnosti obrobeného povrchu **R_a**, jejíž hodnota nesměla překročit hodnotu 0,8 μm. Ve spolupráci s dodavatelem nástrojů bylo vytipováno 8 druhů VBD. V šesti případech šlo o slinuté karbidy (IN2004*, IN2005, IN2010, IN2040, IN0540, IN10K) ve dvou případech o cermety (IN0560, IN60C). Bližší charakteristika testovaných řezných materiálů je uvedena v příloze v kapitole P-2.2. Typové označení pro jednotlivé řezné materiály je používáno v celé příslušné části této práce.

pozn: *) karbid typu IN2004 byl do testování zahrnut až v pozdější fázi, jelikož se jednalo o čerstvou novinku v oblasti VBD pro dokončování. Z tohoto důvodu nebyl testován za stejných kritérií jako ostatní materiály. Bude vysvětleno dále.

9.1.1 Experimentální podmínky

V *tab. 9-1* jsou uvedeny experimentální podmínky, za kterých byl proveden pre-experiment. Za konstantní byly zvoleny tyto řezné podmínky: $f_z = 4,5$ mm; $a_p = 0,02$ mm, a to z toho důvodu, že jsou používány při reálném obrábění v praxi. Vychází-li experiment z požadavku z produktivnit obrábění, je nutné se odrazit od používaných řezných podmínek. Tyto řezné podmínky navíc vyhovovaly všem testovaným řezným materiálům. Z důvodu odvodu třísky z místa řezu bylo nastaveno vnější záplavové chlazení. Nástroj byl osazen pouze 1 VBD, a to z důvodu odstranění vlivu nepřesnosti rozměru VBD nebo nástroje na obrobený povrch. Záběrové podmínky byly specifikovány v kapitole 7.3.

Experimentální podmínky PRE-EXPERIMENT	
řezný materiál	slinutý karbid
v_c [m.min ⁻¹]	150 a 226
n [min ⁻¹]	600 a 900
f_z [mm]	4,5
v_f [mm.min ⁻¹]	2700 a 4050
a_p [mm]	0,02
Chlazení	záplavové
počet VBD	1
sousedné frézování	

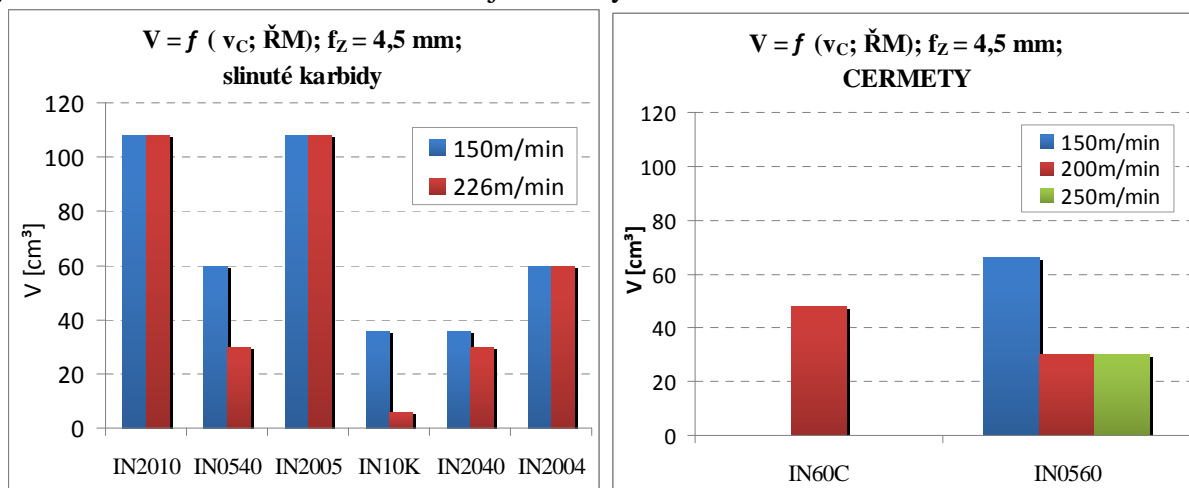
Experimentální podmínky PRE-EXPERIMENT	
řezný materiál	cermet
v_c [m.min ⁻¹]	150, 200 a 250
n [min ⁻¹]	600, 800 a 1000
f_z [mm]	4,5
v_f [mm.min ⁻¹]	2700,3600 a 4500
a_p [mm]	0,02
chlazení	záplavové
počet VBD	1
sousedné frézování	

Tab.9-1 Zvolené řezné podmínky pre-experimentu – pro SK (vlevo) a cermety (vpravo)

Testované hodnoty řezné rychlosti v_c byly zvoleny s ohledem na hodnoty doporučené výrobcem VBD. Jedná se o okrajové hodnoty intervalu doporučených hodnot v_c .

9.1.2 Trvanlivost řezného nástroje

Na *obr.9-1* je provedeno vzájemné porovnání trvanlivosti jednotlivých testovaných VBD. Dosažená hodnota trvanlivosti je zde vyjádřena ve formě objemu odebraného materiálu V . Testování jednotlivých VBD bylo ukončeno v případě, že bylo dosaženo kritériální hodnoty opotřebení, která byla stanovena na hodnotu $VB_B/VB_N = 0,2\text{mm}$ (200 μm), nebo v případě, že bylo dosaženo objemu odebraného materiálu $V = 60\text{ cm}^3$. Tato hodnota odpovídá více než dvojnásobku objemu materiálu, jehož odebrání musí být zaručeno jednou VBD v praktické aplikaci, z níž návrh experimentu vychází. Výjimku tvoří pouze IN2010 a IN2005. Ty byly testovány jako první, kdy bylo kritérium objemu odebraného materiálu nastaveno ještě na vyšší hodnotu.



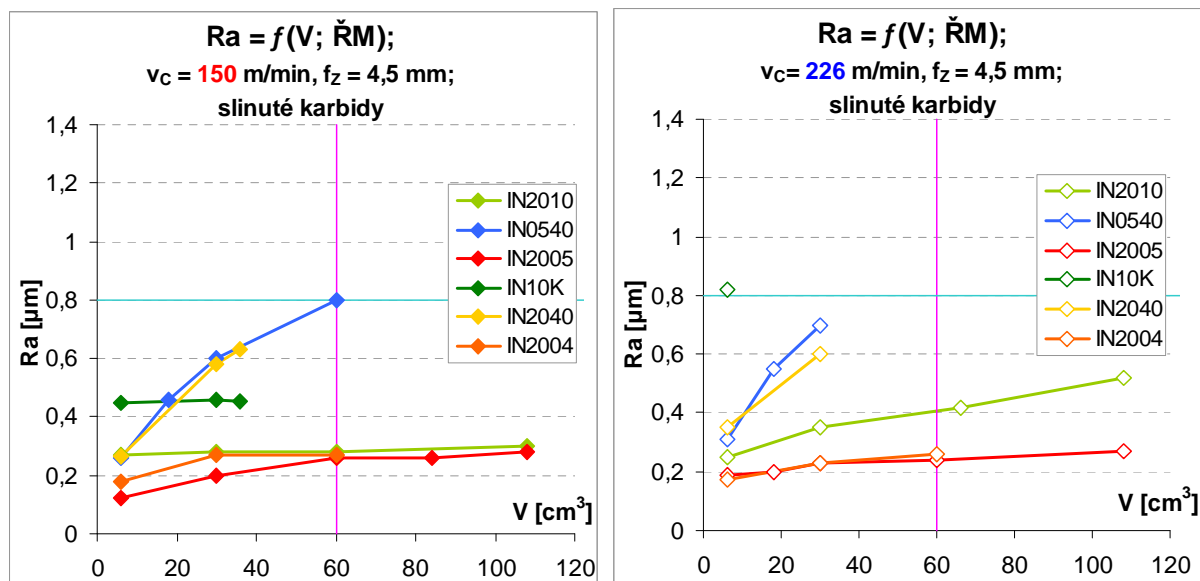
Obr.9-1 Porovnání trvanlivosti jednotlivých řezných materiálů: slinuté karbidy (vlevo), cermety (vpravo)

Z grafů na *obr.9-1* je patrné, které řezné VBD jsou vhodné. Graf vlevo platí pro slinuté karbidy, které byly testovány za dvou řezných rychlostí. Jako vhodné materiály můžeme označit typy IN2010, IN2005 a IN2004. Cermetové VBD byly shledány nevhodnými pro obrábění oceli P91. Bližší informace k průběhům opotřebení pro některé testované materiály jsou uvedeny v příloze v kapitole P-5.1.

Všechny typy VBD se opotřebovali více na hřbetě než na čele nástroje. Velikost opotřebení na hřbetě má výrazný vliv na jakost obrobeneho povrchu, zejména na drsnost.

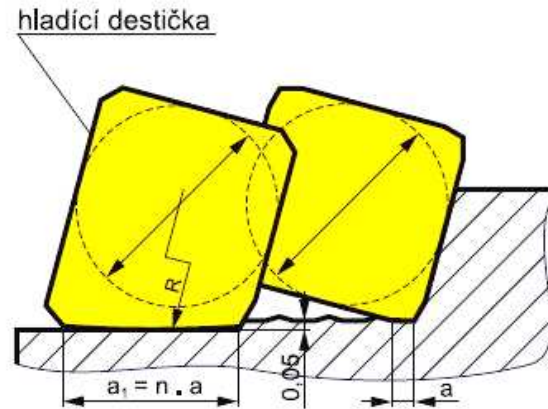
9.1.3 Drsnost obrobeného povrchu

Drsnost obrobeného povrchu je v případě dokončovacího obrábění druhým nejdůležitějším kritériem pro volbu vhodného řezného materiálu. Na **obr.9-2** jsou zobrazeny průběhy dosažených hodnot drsnosti obrobeného povrchu, v tomto případě vyjádřeny hodnotou R_a , pro slinuté karbidy v závislosti na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu V . Na grafu vlevo pro řeznou rychlost $v_c = 150$ m/min a na grafu vpravo pro řeznou rychlost $v_c = 226$ m/min. Kriteriační hodnota drsnosti obrobeného povrchu byla stanovena na hodnotu $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. V tomto případě dokončovacího frézování je drsnost obrobeného povrchu přímo závislá na opotřebení nástroje. Přesněji řečeno na opotřebení na hřbetě VB_N . Obecně je známo, že drsnost obrobeného povrchu se zlepšuje se zvyšující se řeznou rychlostí [27, 32, 65], to však nemusí vždy platit. Pozitivní vliv zvyšující se řezné rychlosti na drsnost obrobeného povrchu platí zejména v případech, kdy se používají VBD běžné konstrukce a dominantní vliv na dosaženou drsnost mají řezné podmínky. V tomto případě se však jedná o speciální typ VBD, přesně o tzv. „hladící VBD“. Úkolem takové „hladící VBD“ je dosažení co možná nejlepšího obrobeného povrchu za všech řezných podmínek [73, 74]. Rozdíl mezi hladící VBD a VBD běžné konstrukce je patrný z **obr.9-3**. Zvyšující se řezná rychlost v_c má tedy v případě použití hladících destiček vliv na drsnost obrobeného povrchu spíše negativní. Velikost řezné rychlosti v_c má totiž výrazný vliv na trvanlivost VBD, čili na velikost opotřebení. Opotřebení má značný vliv na drsnost obrobeného povrchu. V tomto případě byla zjištěna výrazná závislost drsnosti obrobeného povrchu na opotřebení VBD. Tato závislost je zobrazena v příloze v kapitole **P-5.2**.

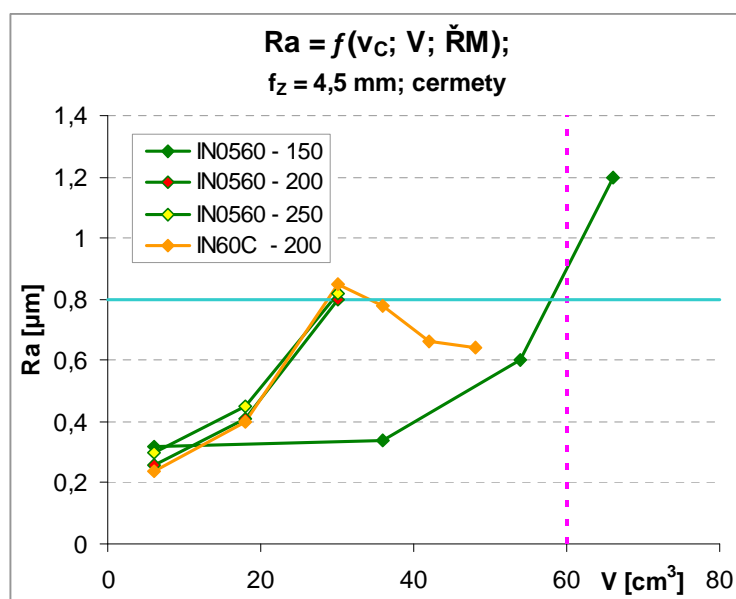


Obr.9-2 Porovnání dosažené drsnosti obrobeného povrchu R_a v závislosti na objemu odebraného materiálu V a změně řezné rychlosti $\Rightarrow v_c = 150$ m/min (vlevo) a $v_c = 226$ m/min (vpravo); pro slinuté karbidy

Z grafů na **obr.9-2** vyplývá, že v případě slinutých karbidů bylo nejlepších výsledků dosaženo s IN2005, IN2004 a IN2010. U IN2010 se však projevil vliv řezné rychlosti. Tato VBD se při testované řezné rychlosti $v_c = 226$ m/min v porovnání s IN2005 a IN2004 poměrně intenzivněji opotřebovávala, což se negativně projevilo na dosažené drsnosti obrobeného povrchu. Karbidy IN10K a IN2040 se jeví jako nevhodné pro obrábění oceli P91. Prozatím není vhodné vyloučit IN0540, neboť za nižší řezné rychlosti dosáhl výsledků v nastavených mezích kritériačních hodnot.



Obr.9-3 Porovnání hladící VBD a VBD běžné konstrukce [74]



Obr.9-4 Porovnání dosažené drsnosti obrobeneho povrchu R_a v závislosti na objemu odebraného materiálu V a změně řezné rychlosti v_c ; pro cermety

Na **obr.9-4** jsou zobrazeny průběhy drsnosti obrobeneho povrchu pro cermetové nástroje. Z grafu je patrné, že ani jeden z těchto typů řezných materiálů se nehodí pro sledovaný charakter obrábění oceli P91. Také zde byla zjištěna jednoznačná závislost drsnosti obrobeneho povrchu na opotřebením nástroje. Pro IN0560 je tato závislost zobrazena v příloze v kapitole **P-5.2**.

Při obrábění dělicí roviny tělesa parní turbíny je důležité dodržet předepsané parametry obrobeneho povrchu. Zejména drsnost obrobeneho povrchu, která nesmí překročit hodnotu $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Z hlediska požadavků na parotěsnost je také důležité, aby dosažená drsnost obrobeneho povrchu měla na celé ploše pokud možno totožnou hodnotu. Ta by se neměla výrazněji měnit v závislosti na dráze ujeté nástrojem. Proto se jako vhodnější řezné materiály jeví ty, s kterými bylo v závislosti na objemu odebraného materiálu dosahováno relativně stejné drsnosti obrobeneho povrchu. Zajímavé porovnání z tohoto hlediska je provedeno na obrázku **P5-7** v příloze v kapitole **P-5.2**.

9.1.4 Efektivní řezný výkon

Důležitost sledování charakteristik efektivního řezného výkonu obráběcího stroje jako dalšího ukazatele hodnocení řezného procesu bylo popsáno v kapitole **8.2.4** (předdokončování). Porovnání závislosti efektivního řezného výkonu na objemu odebraného materiálu pro testované řezné materiály je provedeno v příloze v kapitole **P-5.3**.

9.1.5 Další charakteristiky řezného procesu

Obdobně jako v případě před-dokončovacího obrábění, bylo i v průběhu dokončovacího obrábění přistoupeno k sledování některých dalších charakteristik obrobeného povrchu, jako sledování rovinnosti, sledování případných mikrotrhlin a změny tvrdosti obrobeného povrchu v závislosti na řezných podmínkách či typu řezného materiálu. Nebyly zjištěny žádné změny. Proto bylo v rámci samotného experimentu, kde byly testovány ty nejvhodnější řezné materiály, od těchto činností zcela upuštěno.

9.1.6 Závěr pre-experimentu v oblasti dokončování

Z jednotlivých kapitol vyplývá, že jako nejvhodnější řezné materiály pro dokončovací obrábění vychází tyto VBD: IN2004, IN2005 a IN2010. Ve všech případech se jedná o slinuté karbidy. V porovnání s ostatními testovanými materiály prokázaly větší odolnost proti opotřebení, čímž dosáhli požadované trvanlivosti a bylo s nimi dosaženo nejlepších výsledků s ohledem na drsnost obrobeného povrchu. Tyto řezné materiály při pre-experimentu dokázaly, že mají potenciál na to, aby jejich nasazením byly splněny požadavky, které jsou kladeny na sledovanou oblast obrábění.

Nevýhodou IN2005 je vyšší pořizovací cena v porovnání s ostatními VBD. To byl také důvod, proč byl tento typ na žádost zadavatele projektu z dalšího testování vyloučen. V návaznosti na toto rozhodnutí byl pro další testování zvolen karbid typu IN0540. To hned z několika důvodů:

1. Tento materiál je v současnosti používán pro tuto operaci v reálném procesu => bude možné již během experimentu odhadnout případný přínos ostatních testovaných VBD pro budoucí aplikaci.
2. Tento materiál za určitých podmínek splnil stanovená kritéria => je tu potenciál dosáhnout lepších výsledků další volbou vhodných řezných podmínek.
3. Testování ve fázi dokončovací není z hlediska experimentálního obrobku tak materiálově náročné, takže je možné otestovat další typ ŘM navíc => to pomůže rozšířit oblast poznatků týkajících se obrábění oceli P91 v energetickém průmyslu.

Pro další testování byly vybrány typy IN2004, IN2010 a IN0540. Z hlediska vlivu řezné rychlosti byl zjištěn potenciál u IN2004, a v rámci samotného experimentu bude vhodné tento materiál otestovat za vyšší řezné rychlosti. Pro IN2010 a IN0540 vychází vyšší testovaná hodnota řezné rychlosti ($v_c = 226$ m/min) jako hraniční a bude spíše vhodné otestovat nižší hodnoty řezných rychlostí.

9.2 EXPERIMENT

Experiment navazuje na pre-experiment (kapitola 9.1). Jako nejvhodnější řezné materiály pro další testování byly zvoleny slinuté karbidy: IN2004 a IN2010 a IN0540. Tyto karbidy byly testovány za podmínek uvedených v tabulce 9-2, platných pro celý experiment.

Experimentální podmínky	
EXPERIMENT	
řezný materiál	IN2004; IN2010, IN0540
označení VBD	YDA323L101
v_c [m.min ⁻¹]	150 - 300
f_z [mm]	3; 4,5; 6
a_p [mm]	0,02
chlazení	vnější záplavové
počet VBD	1
sousedné frézování	

Tab.9-2 Řezné podmínky experimentu

Kombinace řezných podmínek pro jednotlivé řezné materiály jsou uvedeny v tabulce 9-3. Tyto řezné podmínky byly navrženy v závislosti na hodnotách doporučených výrobcem v kombinaci s výsledky pre-experimentu. Z důvodů časové a materiálové náročnosti experimentální činnosti nebylo možné provést plně faktorový experiment. Nejprve tedy byly všechny testované řezné materiály sledovány v závislosti na změně řezné rychlosti v_c . Poté byla v závislosti na výsledcích stanovena nejvhodnější řezná rychlost. Za této řezné rychlosti byl každý materiál dále sledován v závislosti na změně hodnoty posuvu na zub f_z . Byly zvoleny tyto hodnoty f_z : 3; 4,5 a 6 mm.

IN2004				IN2010				IN0540			
f_z [mm]				f_z [mm]				f_z [mm]			
v_c [m/min]	3	4,5	6	v_c [m/min]	3	4,5	6	v_c [m/min]	3	4,5	6
150		X		150		X		150	X	X	X
226		X		180		X		180		X	
270	X	X	X	200	X	X	X	200		X	
300		X		226		X		226		X	

Tab.9-3 Řezné podmínky pro jednotlivé řezné materiály

V následujících kapitolách jsou testované VBD sledovány nejprve samostatně. Teprve v závěru je provedeno jejich vzájemné porovnání. To je ovšem možné provést pouze v případě, kde byly použity totožné řezné podmínky.

Kriteriální hodnota opotřebení byla stanovena na $VB_B/KB = 0,2$ mm. Dalšími kritérii byla drsnost obrobeného povrchu $R_a = 0,8$ μm a objem odebraného materiálu $V = 30$ cm^3 . V požadavcích na praktickou aplikaci je stanoveno, že VBD musí obrobit 25 cm^3 . Hodnota $V = 30$ cm^3 byla zvolena z důvodu, že zaručuje 20% rezervu z hlediska splnění požadavku na objem odebraného materiálu V a odpovídá přesně 100 přejezdům nástroje přes experimentální obrobek. Bylo-li dosaženo některé z těchto hodnot, bylo testování ukončeno. Až na jedinou výjimku bylo vždy dosaženo požadovaného objemu odebraného materiálu V . Experiment byl třikrát opakován.

V počáteční fázi experimentálního studia v rámci dokončovacího frézování byl na FST/KTO pořízen nový drsnoměr MarSurf M300. Jeho bližší specifikace je uvedena v kapitole P-1.2 přílohy. Tento nový drsnoměr umožňuje o měřeném povrchu získat více informací v lepší formě. To rozšířilo dosavadní možnosti sledování obrobeného povrchu. Zejména co se týče profilu obrobeného povrchu a práce s ním. Celkově bylo provedeno více než 3000 náměrů a bylo tedy získáno více než 3000 profilů sledovaných obrobených povrchů. Aby bylo možno s tímto objemem dat pracovat a využít je v rámci této práce, byla použita metodika, která je blíže specifikována v příloze v kapitole P-3.

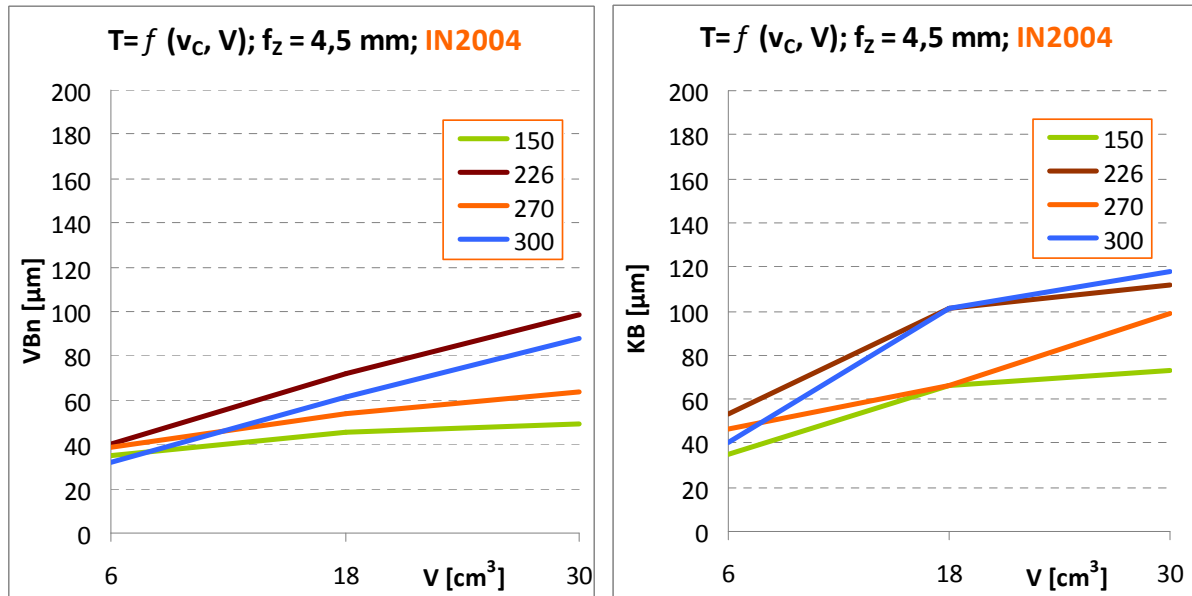
9.2.1 IN2004

V případě karbidu IN2004 jde o VBD s PVD povlakem AlTiN. Dle katalogu výrobce se jedná o vysoce výkonný širokorozsahový karbid. kombinující vysokou odolnost proti opotřebení s vysokou houževnatostí pro frézování legované oceli a litiny. Je aplikovatelný pro střední až vyšší řezné rychlosti, pro dokončování a předdokončování za stabilních podmínek obrábění. Poloměr zaoblení ostří r_N je přibližně 14 μm .

9.2.1.1 Trvanlivost – IN2004

V grafech na obr.9-5 je zobrazena závislost opotřebení na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu a změně řezné rychlosti. Je zde porovnáno opotřebení na hřbetě VB_N (vlevo) a na čele KB (vpravo). Ve všech případech se VBD opotřebovala rovnoměrně v závislosti na objemu odebraného materiálu. Za vyšších rychlostí bylo dosaženo vyšších hodnot opotřebení. Výjimku tvoří pouze hodnota řezné rychlosti $v_c = 226$ m/min. Při této řezné rychlosti bylo dosaženo nejvyšších hodnot opotřebení, zejména na hřbetě. Příčinou tohoto opotřebení byl nárůstek, který

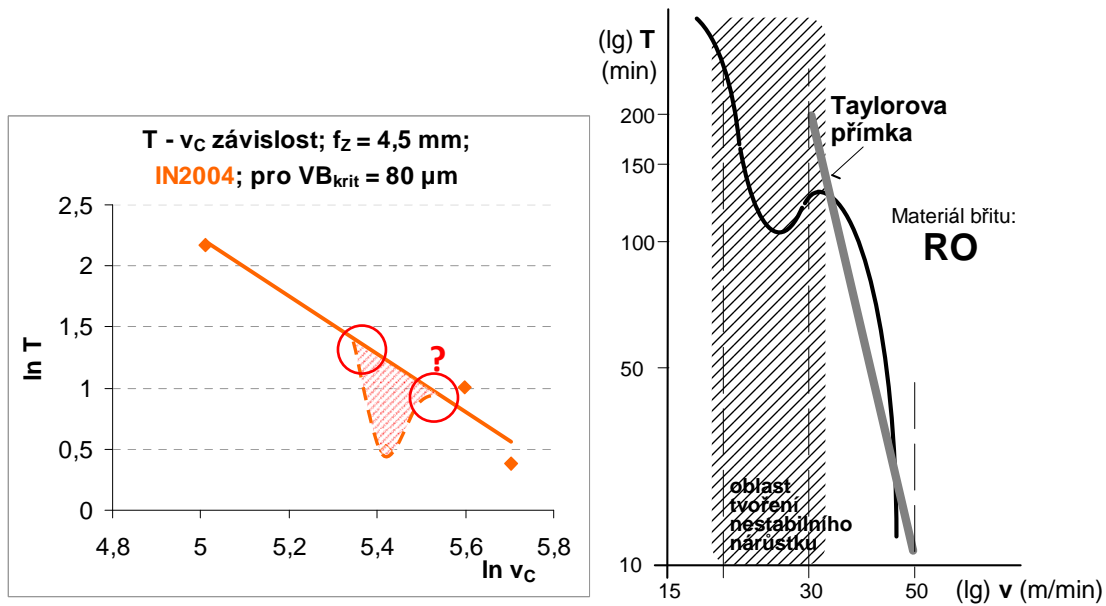
vznikal na břitu. Všeobecně je známo, že při obrábění korozivzdorných ocelí se velmi často vyskytuje interval řezných rychlostí (tzv. přechodová oblast), za kterých vzniká nárůstek. Poloha této oblasti může být ovlivněna více faktory (řezný materiál, obráběný materiál, řezné podmínky, atd.). Za těchto testovaných podmínek se tato oblast vyskytovala v okolí hodnoty řezné rychlosti $v_C = 226$ m/min (bylo potvrzeno i u ostatních VBD).



Obr.9-5 Opatření nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na změně řezné rychlosti v_C a objemu odebraného materiálu V ; $f_z = 4,5$ mm; IN2004

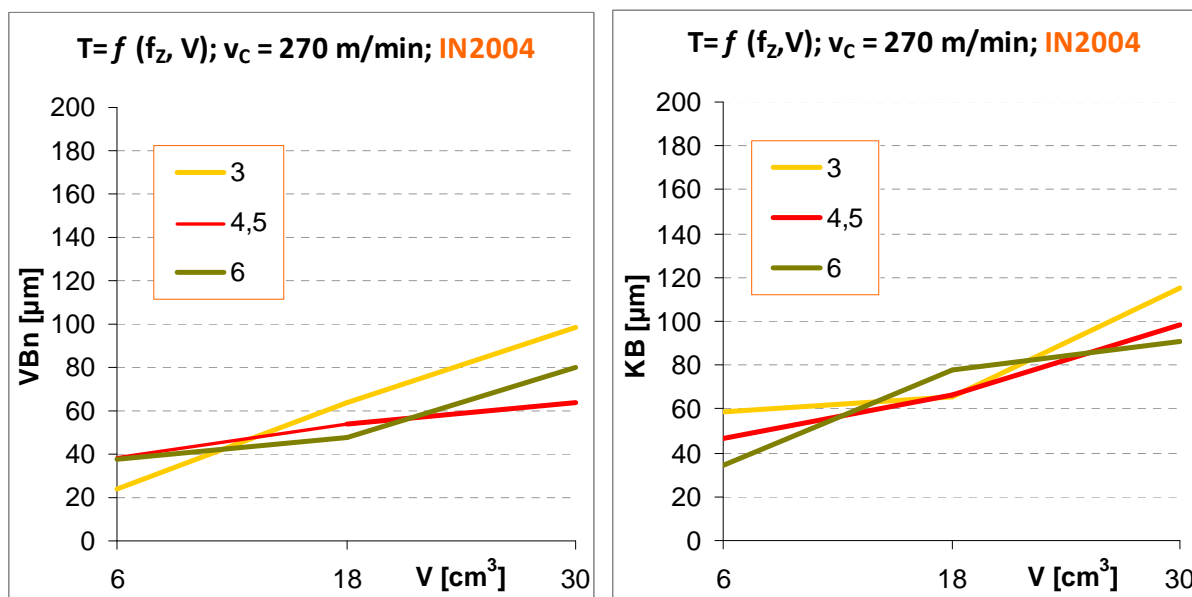
Ve všech případech se břit opotřeboval rovnoměrně, abrazivní formou, na hřbetě nástroje. Pouze výjimečně se objevil žlábek na hřbetě, zejména ve vzdálenosti f_z od špičky VBD. Dále se vyskytovalo opotřebení ve tvaru hřebenovitých trhlin na ostří. Toto opotřebení vznikalo také nejčastěji ve vzdálenosti rovné hodnotě f_z od špičky VBD. Porovnání opotřebení VBD pro jednotlivé řezné rychlosti je v příloze v tabulce P5-1, kap.P-5.4. Ve všech případech je zobrazen stav po odebrání $V = 30\text{cm}^3$.

Byla také stanovena $T-v_C$ závislost viz **obr.9-6**. Pomocí této závislosti byl následně stanoven Taylorův vztah (**R-9**). Řezná rychlost $v_C = 226$ m/min nebyla do této závislosti zahrnuta. Do grafu (**obr.9-6**) byla ale pro názornost vyznačena jako samostatný bod. Vyšrafovaná plocha určuje předpokládanou oblast tvoření nárůstku. Přesné ohraničení této oblasti vyžaduje další experimentální testování. V oblasti kolem $v_C = 226$ m/min tedy zjištěná závislost neplatí. Pro názornost je zde uvedena $T-v_C$ závislost pro rychlořeznou ocel, kde se také vyskytuje oblast tvoření nárůstku [85].



Obr.9-6 T- v_c závislost pro IN2004 ; $f_z = 4,5$ mm; $VB_{KRIT} = 80$ μm a T- v_c závislost pro RO [85]

$$T_{IN2004} = \frac{13 \cdot 10^5}{v_c^{2,52}} \text{ [min]} \quad (R-9)$$

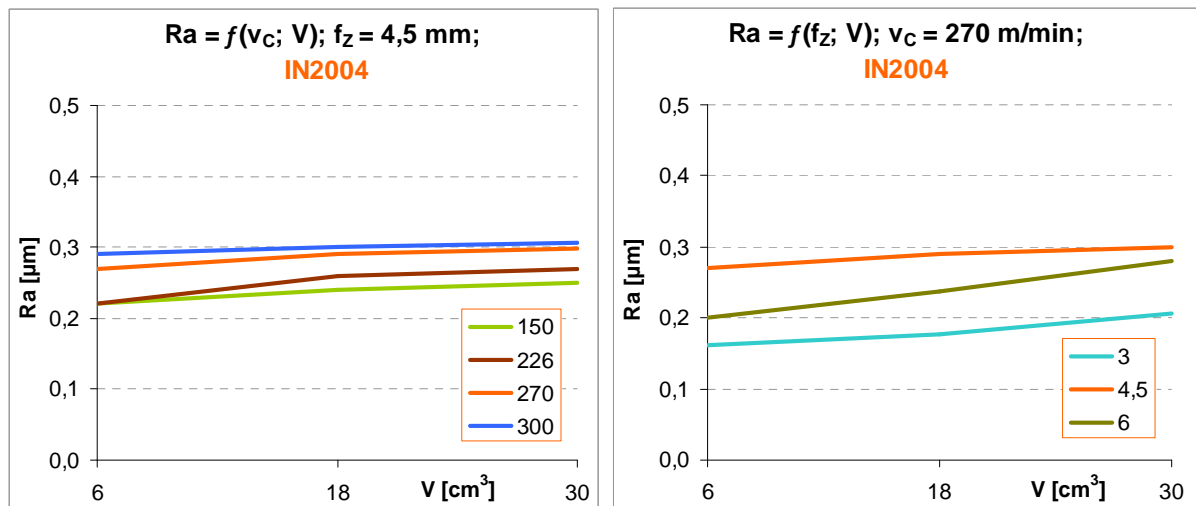


Obr.9-7 Opotřebení nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na změně posuvu f_z a objemu odebraného materiálu V; $v_c = 270$ m/min; IN2004

V závislosti na změně posuvu f_z se nástroj nejvíce opotřebovával v případě hodnoty $f_z = 3$ mm. To je způsobeno tím, že při posuvu $f_z = 3$ mm trvá obrábění 1,5x a 2x déle v porovnání s hodnotami 4,5mm a 6mm. VBD je tak delší dobu v řezu. Nicméně v žádném případě nebylo dosaženo ani zdaleka kritériální hodnoty opotřebení. Porovnání opotřebení VBD pro jednotlivé hodnoty f_z je v příloze v tabulce P5-2, kap.P-5.4 Ve všech případech je zobrazen stav po obrobení 30cm³.

9.2.1.2 Drsnost obrobeneho povrchu a nosný podíl profilu– IN2004

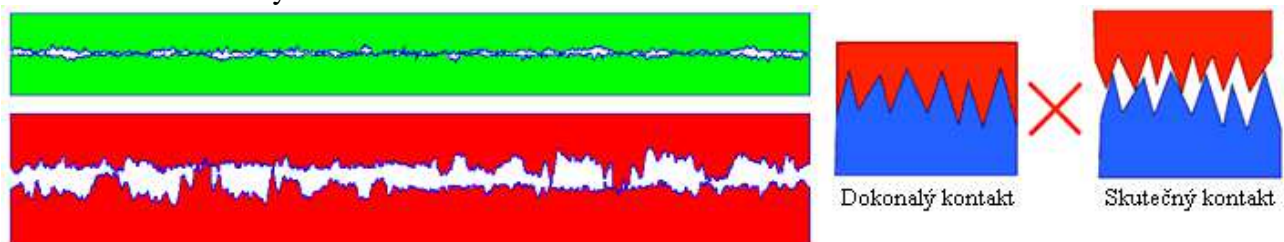
Na *obr.9-8* vlevo jsou vyobrazeny průběhy drsností obrobeneho povrchu (vyjádřené pomocí parametru R_a) v závislosti na změně řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu V . Vpravo jsou vyobrazeny průběhy v závislosti na změně posuvu f_z a V . Dosažená drsnost obrobeneho povrchu se pohybuje v intervalu $R_a = 0,2 \div 0,3 \mu\text{m}$. Rozdíl mezi jednotlivými průběhy je zanedbatelný. Přesto je možné pozorovat, že se zvyšující se řeznou rychlostí se drsnost nepatrně zhoršuje. V tomto případě navíc nebyla zjištěna žádná závislost mezi opotřebováním VBD a dosaženou drsností. Drsnost se téměř nemění ani v závislosti na zvětšujícím se objemu odebraného materiálu V .



Obr.9-8 Závislost drsnosti obrobeneho povrchu na objemu odebraného materiálu při změně řezné rychlosti v_c (vlevo) a změně posuvu f_z (vpravo); IN2004

V příloze v *kap.P-5.4* na *obr.P5-10* jsou pro doplnění zobrazeny totožné závislosti drsnosti obrobeneho povrchu, vyjádřené pomocí parametru R_z .

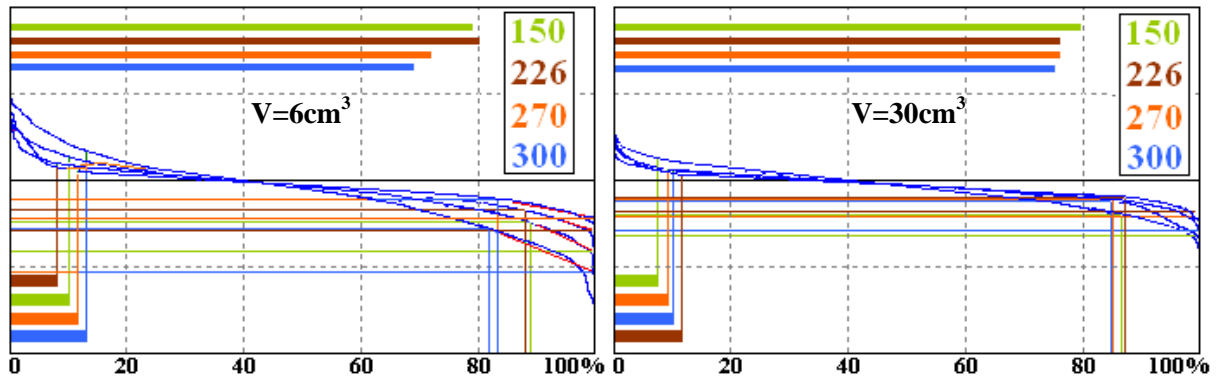
Jedním z požadavků kladených na dělicí rovinu tělesa parní turbíny je také její parotěsnost. Tu není lehké pomocí běžných parametrů drsnosti posoudit. Určitý obraz o parotěsnosti obrobeneho povrchu je možné si udělat porovnáním materiálových křivek profilu. V rámci této práce bylo provedeno relativní porovnání jednotlivých obrobeneho povrchů v závislosti na řezných podmínkách. Jakým způsobem bylo toto porovnání realizováno je popsáno v příloze v *kap.P-3.3*. V grafu na *obr.9-10* je provedeno porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části v závislosti na v_c a V . Z hlediska parotěsnosti je důležité, aby podíl nosného profilu (v grafech vyjádřen barevnými úsečkami v horní části) byl co největší a kritická část profilu (extrémní výstupky drsnosti => v grafech vyjádřeny barevnými úsečkami v levém dolním rohu) co nejmenší. V průběhu řešení této práce nebyla nalezena žádná publikace či informační zdroj zabývající se vlivem drsnosti obrobeneho povrchu na parotěsnost. Proto se zde jedná spíše o doplňkovou informaci než o absolutní závěry.



Obr.9-9 Kontakt dvou těles při rozdílné drsnosti (vlevo) a možnosti kontaktu při totožné drsnosti (vpravo) [83]

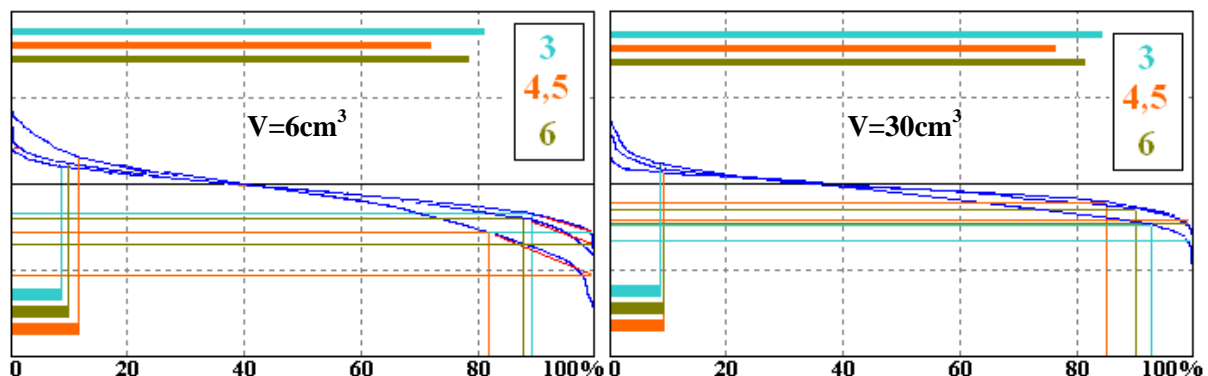
Důležitým parametrem je velikost kritické části nosného podílu profilu. To jsou extrémní výstupky drsnosti. V ideálním případě by při kontaktu dvou těles došlo k dokonalému kontaktu viz *obr.9-9*

K tomu ale ve skutečnosti nedojde, obzvláště ne u tak velkých ploch, jako jsou dělicí roviny tělesa parní turbíny. Samotná výška těchto extrémů je důležitá zejména ve vztahu k jejich procentuálnímu podílu na ploše povrchu [70]. Je zde totiž předpoklad, že jedno procento výstupků, přesahující profil např. o 20 μ m je zanedbatelné, oproti výškovému přesahu o 5 μ m na 20% plochy.



Obr.9-10 Porovnání podílu nosného profilu a jeho kritické části z hlediska parotěsnosti v závislosti na v_c a V ;
 $f_z = 4,5$ mm; IN2004

Jako nejvhodnější řezná rychlost, z hlediska parotěsnosti obroběného povrchu, se jeví hodnota $v_c = 150$ m/min. Porovnáním grafů na *obr.9-8* a *9-10* je možné konstatovat, že spolu zjištěné výsledky korespondují. Vliv posuvu f_z a objemu odebraného materiálu V na změnu nosného podílu profilu je patrný z grafu na *obr.9-11*. Zde dokonce dochází ke zlepšení stavu obroběného povrchu v závislosti na zvyšujícím se objemu V z hlediska nosného podílu.



Obr.9-11 Porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části z hlediska parotěsnosti v závislosti na f_z ;
 $v_c = 270$ m/min, IN2004

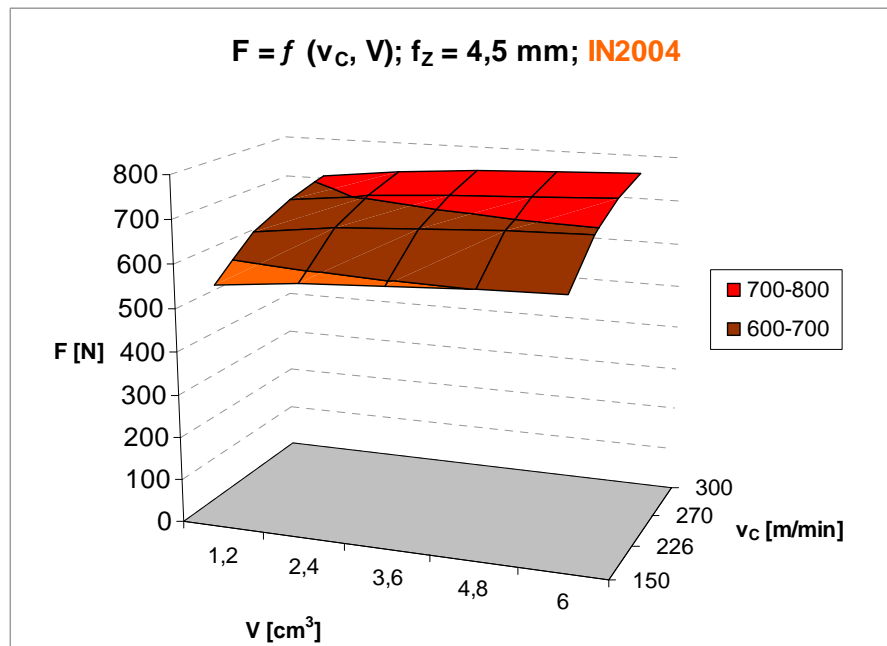
Porovnání samotných reprezentativních profilů v závislosti na měnících se řezných podmínkách v_c a f_z je provedeno v příloze na obr.P5-11 a P5-12, kapitol P-5.4

9.2.1.3 Celkové silové zatížení – IN2004

Pro hodnocení silového zatížení řezného procesu v oblasti dokončovacího frézování bylo postupováno stejným způsobem, jako v případě před-dokončovacího frézování viz úvod kapitoly 8.2.5 (před-dokončování). V případě všech sledovaných řezných materiálů bylo silové zatížení sledováno pouze v první pětině obrábění, čili do hodnoty $V = 6$ cm³. To proto, aby byl eliminován vliv opotřebení.

Vliv řezné rychlosti v_c na velikost celkového silového zatížení byl již popsán v kapitole 8.2.5 (před-dokončování). Také v případě dokončovacího frézování VBD typu IN2004 celkové silové zatížení narůstá v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti (viz *obr.9-12*). Téměř lineární nárůst je patrný v závislosti na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu V . Vliv samotného opotřebení

však není nikterak výrazný. Silové zatížení narůstá rovnoměrně pro všechny hodnoty řezné rychlosti. Výraznější je tady vliv samotné řezné rychlosti v_C .



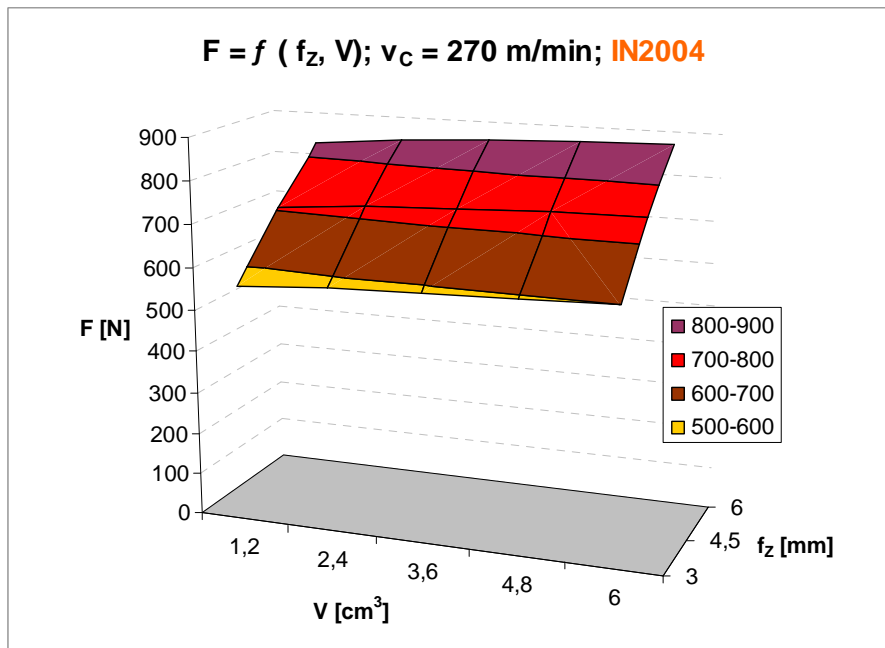
Obr.9-12 Závislost celkového silového zatížení F na řezné rychlosti v_C a objemu odebraného materiálu V pro IN2004; $f_z = 4,5\text{mm}$

Zjištěná závislost pro silové zatížení VBD IN2004 na změně v_C a V je vyjádřena pomocí rovnice **R-10**.

$$F_{IN2004} = 107 \cdot v_C^{0,32549} \cdot V^{0,046} [N] \quad (R-10)$$

Výsledky statistické analýzy a vyrovnání závislostí celkového silového zatížení F pro IN2004 při změně v_C jsou uvedeny v příloze v kapitole P-5.4, tab.P5-3.

Grafické znázornění závislosti F na změně posuvu f_z a objemu odebraného materiálu V pro VBD typu IN2004 je na **obr.9-13**. Jak je z grafu patrné, silové zatížení se zvětšuje se zvětšující se hodnotou f_z . To je samozřejmě způsobeno zvětšujícím se průřezem odřezávané vrstvy. Tento vliv je výrazný a je obdobný pro všechny hodnoty f_z .



Obr.9-13 Závislost celkového silového zatížení F na změně posuvu f_z a objemu odebraného materiálu V pro IN2004; $v_c = 270 \text{ m/min}$

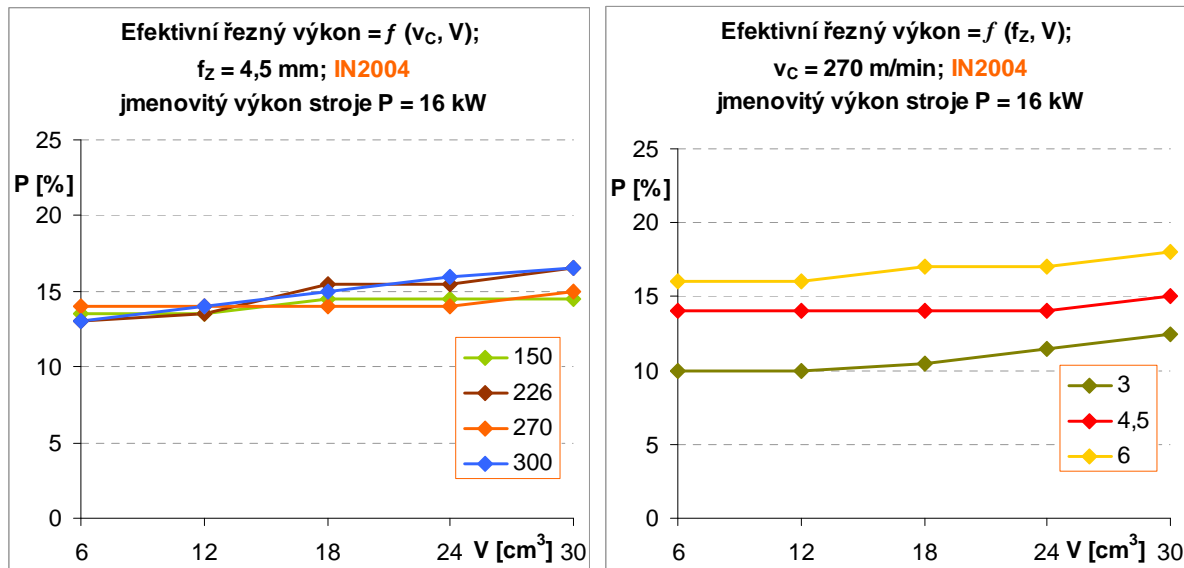
Zjištěná závislost pro silové zatížení VBD IN2004 na změně f_z a V je vyjádřena pomocí rovnice **R-11**.

$$F_{IN2004} = 304 \cdot f_z^{0,5448} \cdot V^{0,0342} [N] \quad (\text{R-11})$$

Výsledky statistické analýzy a vyrovnání závislostí celkového silového zatížení F pro IN2004 při změně f_z jsou uvedeny v příloze v kapitole P-5.4, tab.P5-4.

9.2.1.4 Efektivní řezný výkon - IN2004

Opodstatnění sledování efektivního řezného výkonu obrábění v závislosti na parametrech řezného procesu je popsáno v kapitole 8.2.4 (předdokončování). V grafech na obrázku 9-14 jsou zobrazeny charakteristiky efektivního řezného výkonu obrábění v závislosti na změně řezné rychlosti v_c (vlevo) a posuvu f_z (vpravo). Vliv řezné rychlosti je nepatrný. Obecně lze říci, že se zvyšující se hodnotou v_c se efektivní řezný výkon zvyšuje. Rozdíl pro jednotlivé hodnoty v_c se však pohybuje v intervalu 1 ÷ 2 %. Výrazný vliv má ale změna posuvu f_z . Se zvyšujícím se posuvem f_z narůstá efektivní řezný výkon. Výkon je samozřejmě značně závislý na silovém zatížení řezného procesu, proto jsou výkonové charakteristiky velmi podobné silovému zatížení (viz obr.9-12 a 9-13).



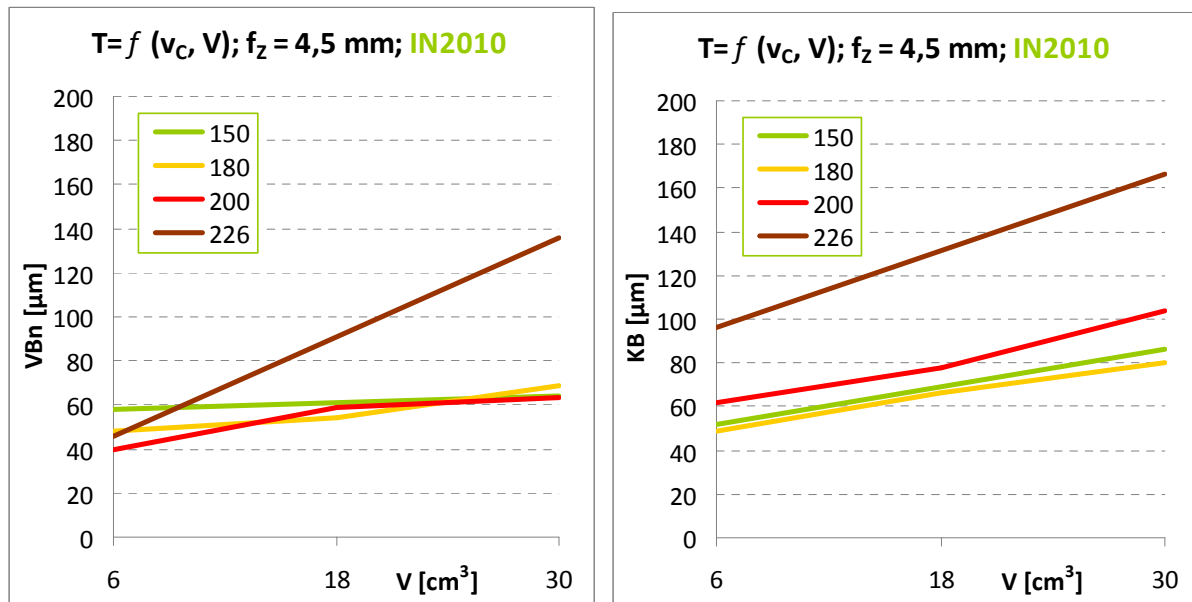
Obr.9-14 Efektivní řezný výkon v závislosti na objemu odebraného materiálu, změně řezné rychlosti v_c (vlevo) a posuvu f_z (vpravo); IN2004

9.2.2 IN2010

V případě karbidu typu IN2010 se jedná o VBD povlakované vrstvou TiAlN. Tento typ je charakteristický dobrou odolností proti opotřebení při obrábění šedé litiny a to za středních až vyšších řezných rychlostí. Je také vhodný zejména tehdy, když je použita pozitivní řezná geometrie a za nepříznivých řezných podmínek. Poloměr zaoblení ostří r_N je přibližně 12 μ m.

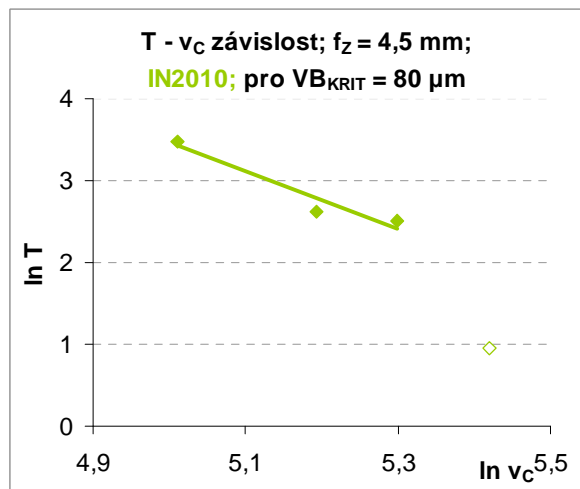
9.2.2.1 Trvanlivost – IN2010

V grafech na *obr.9-15* je zobrazena závislost opotřebení na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu a změně řezné rychlosti. Je zde porovnáno opotřebení na hřbetě VB_N (vlevo) a na čele KB (vpravo). V závislosti na zvyšující se řezné rychlosti bylo zjištěno, že při hodnotě $v_c \leq 200$ m/min se VBD opotřebovávala rovnoměrně a opotřebení nebylo nikterak intenzivní. Jednalo se o abrazivní opotřebení. Rychleji se opotřebovávalo čelo VBD. Hodnoty opotřebení však nedosáhly ani poloviny stanoveného kritéria. Při $v_c = 226$ m/min docházelo k velmi intenzivnímu opotřebení, jak na hřbetě, tak na čele VBD. Jednalo se jak o rovnoměrné abrazivní opotřebení, tak také o hřebenové trhliny. Opotřebení formou hřebenových trhlin vznikalo ve vzdálenosti f_z od špičky VBD. V těchto místech je nástroj nejvíce namáhán. V blízkosti špičky VBD také vznikal nárůstek. To potvrzuje předpoklad, že hodnota $v_c = 226$ m/min patří do intervalu nevhodných řezných rychlostí pro obrábění oceli P91 (viz výsledky IN2004 => *kap.9.2.1.1*). Porovnání opotřebení VBD pro jednotlivé řezné rychlosti je v tabulce *P5-5*, *kap.P-5.5*. Ve všech případech je zobrazen stav po obrobení 60cm³.



Obr.9-15 Opořebení nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na změně řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu V ; $f_z = 4,5 \text{ mm}$; IN2010

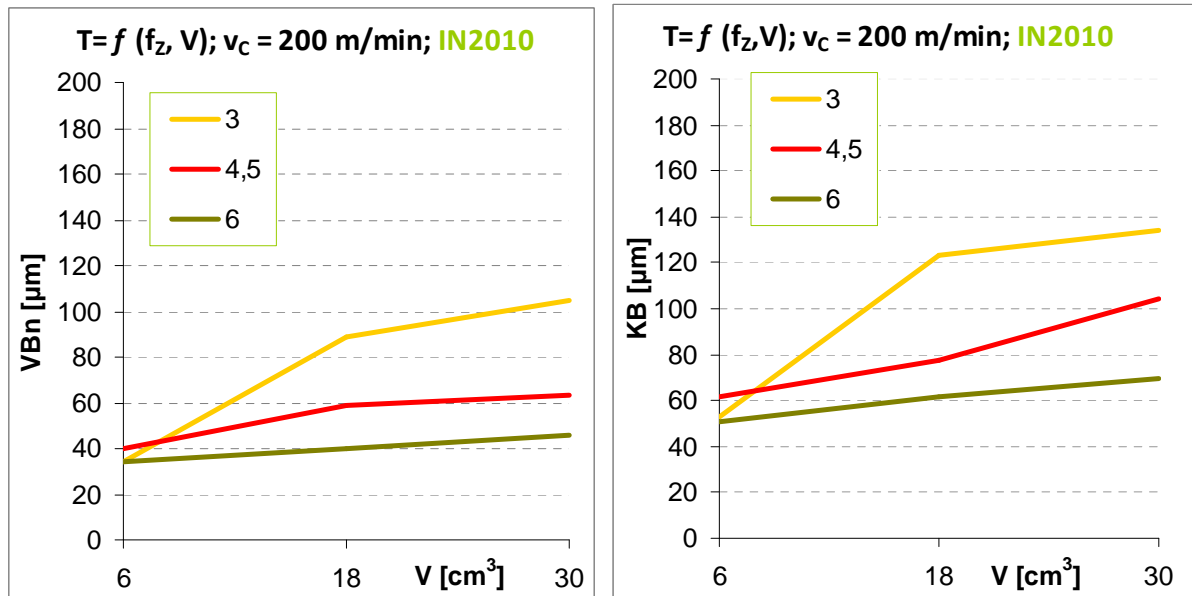
Byla také stanovena $T-v_c$ závislost viz *obr.9-16*. Pomocí této závislosti byl následovně stanoven Taylorův vztah (R-12). Obdobně jako v případě IN2004 také zde nebyla $v_c = 226 \text{ m/min}$ do závislosti zahrnuta. V tomto případě se ale jednalo o okrajovou hodnotu. Zobrazená $T-v_c$ závislost tedy platí v celém intervalu.



Obr.9-16 $T-v_c$ závislost pro IN2010; $f_z = 4,5 \text{ mm}$; $\text{VB}_{\text{KRIT}} = 80 \mu\text{m}$

$$T_{\text{IN2010}} = \frac{1,4 \cdot 10^9}{v_c^{3,5}} [\text{min}] \quad (\text{R-12})$$

Na *obr.9-17* jsou zobrazeny závislosti opořebení, na hřbetě (vlevo) a čele (vpravo), na zvětšujícím se objemu odebraného materiálu V a změně posuvu f_z . Vliv samotného posuvu je jednoznačný. Nejvíce se VBD opořebávávala při nejnižší hodnotě posuvu a naopak. Stejně jako v případě IN2004 je to způsobeno tím, že na odstranění $V = 30 \text{ cm}^3$ materiálu je při $f_z = 3 \text{ mm}$ potřeba dvojnásobného času v porovnání s $f_z = 6 \text{ mm}$. To znamená, že VBD je namáhána 1,5 a 2 násobně v porovnání s ostatními hodnotami f_z .

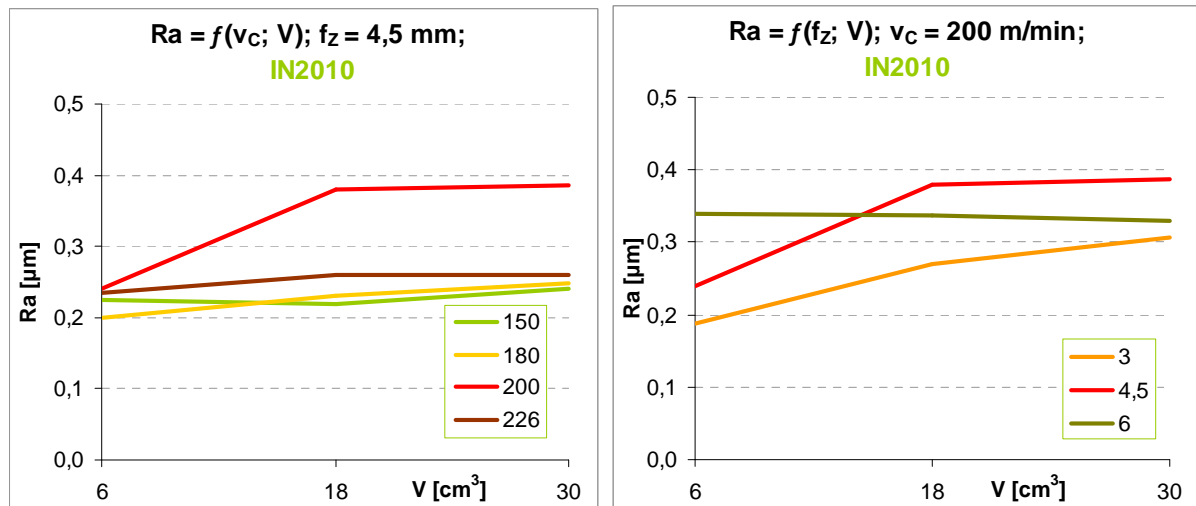


Obr.9-17 Opatření nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na změně posuvu f_z a objemu odebraného materiálu V ; $v_c = 200$ m/min; IN2010

Porovnání opotřebení VBD pro jednotlivé hodnoty f_z je v příloze v tabulce **P5-6, kap.P-5.5**. Ve všech případech je zobrazen stav po obrobení 30cm^3 . VBD se opotřebovávaly abrazivně a rovnoměrně. Při posuvu $f_z = 3$ mm se obejevovalo opotřebení ve tvaru hřebenových trhlin, a to v oblasti vzdálené od špičky nástroje přibližně 3 mm ($\sim f_z$). V této oblasti také vznikal nárůstek. Nárůstek také vznikal při hodnotě $f_z = 4,5$ mm. V tomto případě byl sice menší, avšak na větší části ostří.

9.2.2.2 Drsnost obrobeného povrchu a nosný podíl profilu – IN2010

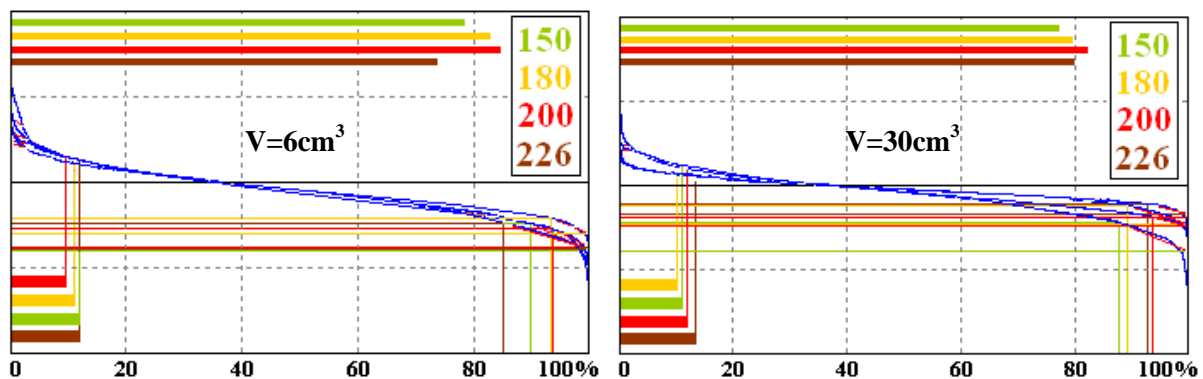
Na **obr.9-18** vlevo jsou vyobrazeny průběhy drsností obrobeného povrchu (vyjádřené pomocí parametru R_a) v závislosti na změně řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu V . Vpravo jsou vyobrazeny průběhy v závislosti na změně posuvu f_z a V . Dosažená drsnost obrobeného povrchu v závislosti na v_c se pohybuje v intervalu $R_a = 0,2 \div 0,3 \mu\text{m}$ a nedochází k nijak intenzivnímu zhoršování v závislosti na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu. Výjimkou je ale hodnota $v_c = 200$ m/min. V porovnání s opotřebením VBD za daných podmínek vyplývá, že spíše než opotřebení ve formě žlábků či hřebenových trhlin ovlivňuje drsnost obrobeného povrchu vznik nárůstku. Ačkoliv se nástroj nejvíce opotřeboval při $v_c = 226$ m/min, nejhorší drsnosti obrobeného povrchu bylo dosaženo při $v_c = 200$ m/min. Nicméně hodnota R_a nepřekročila hranici $0,4 \mu\text{m}$.



Obr.9-18 Závislost drsnosti obrobeneho povrchu na objemu odebraného materiálu při změně řezné rychlosti v_c (vlevo) a změně posuvu f_z (vpravo); IN2010

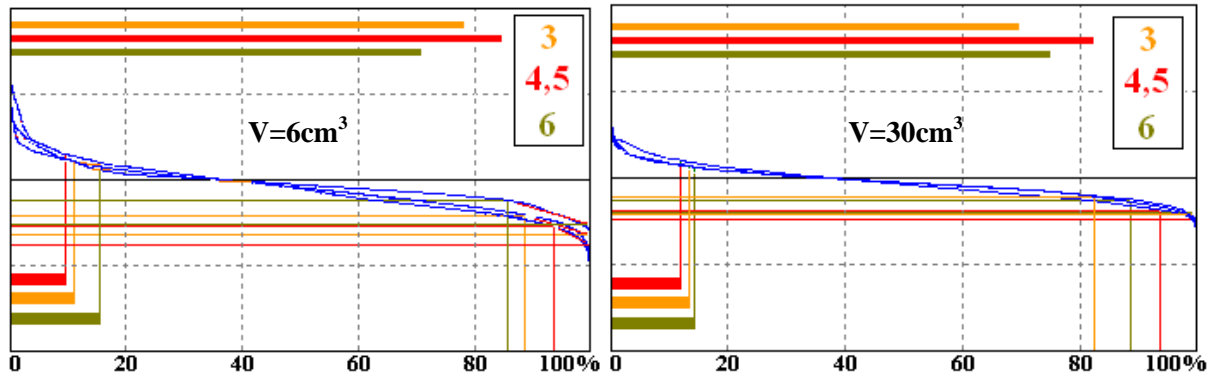
Vliv posuvu f_z na drsnost obrobeneho povrchu je patrný z grafu vpravo na *obr.9-18*. V tomto případě byla konstantní řezná rychlost $v_c = 200 \text{ m/min}$. Nejprve převládá vliv samotného posuvu, kdy vyšší posuv f_z znamená horší drsnost obrobeneho povrchu. Po určité době ale začíná převládat vliv opotřebení. V případě hodnoty $f_z = 3 \text{ mm}$ dochází k intenzivnímu opotřebení v závislosti na zvětšujícím se objemu odebraného materiálu a tím i ke zhoršení drsnosti R_a . Nicméně nejvyšší hodnoty R_a je dosaženo při posuvu $f_z = 4,5 \text{ mm}$ vlivem tvoření nárůstku. Nejméně se opotřebovala VBD při $f_z = 6 \text{ mm}$, což se také projevilo na průběhu R_a . Ani zde však v žádném případě hodnota R_a nepřekročila hranici $0,4 \mu\text{m}$.

V příloze v *kap.P-5.5* na *obr.P5-14* jsou pro doplnění zobrazeny totožné závislosti drsnosti obrobeneho povrchu, vyjádřené pomocí parametru R_z .



Obr.9-19 Porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části z hlediska parotěsnosti v závislosti na v_c ; $f_z = 4,5 \text{ mm}$, IN2010

Na *obr.9-19* je provedeno porovnání nosných podílů profilů a jejich kritických částí v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu V . Se zvyšujícím se V dochází ke zmenšení nosného podílu a nárůstu jeho kritické části při všech řezných rychlostech. Největší zhoršení je patrné u $v_c = 226 \text{ m/min}$. Zajímavé je porovnání *obr.9-18 a 9-19* z hlediska $v_c = 200 \text{ m/min}$. Zatímco po obrobení $V = 6 \text{ cm}^3$ je hodnota R_a v porovnání s ostatními nejvyšší, tak nosný podíl profilu dosahuje nejlepších parametrů. A když dojde v závislosti na V až k dvojnásobnému nárůstu hodnoty R_a , zvýší se sice kritická část profilu, nicméně samotný nosný podíl zůstává stále největší.



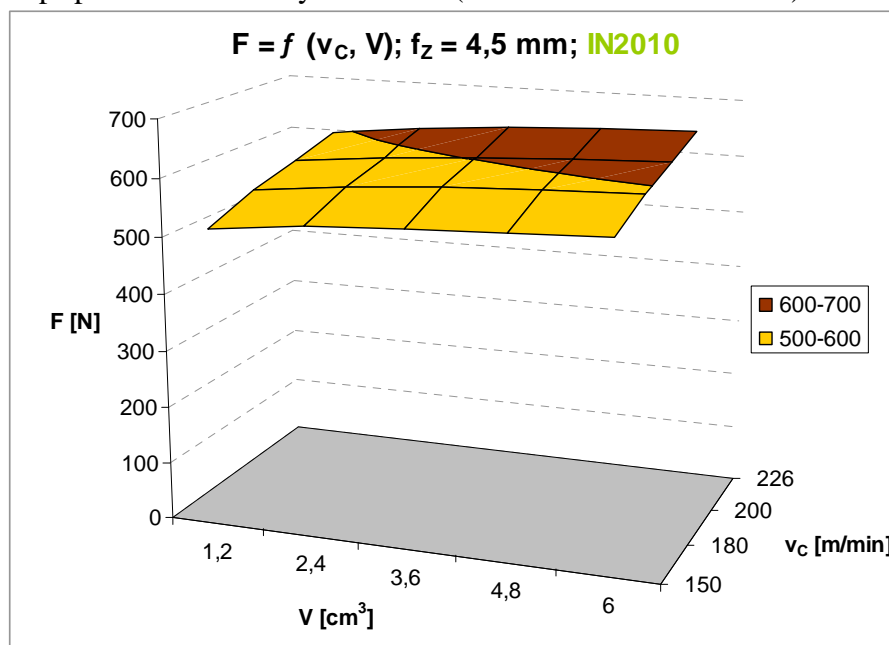
Obr.9-20 Porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části z hlediska parotěsnosti v závislosti na f_z ; $v_c = 200$ m/min, IN2010

Vliv posuvu f_z a V na nosný podíl profilu obrobeného povrchu je na **obr.9-20**. Zde se jako nejvhodnější jeví hodnota $f_z = 4,5$ mm. Se zvyšujícím se objemem odebraného materiálu dochází k nepatrnému zhoršení u posuvů $f_z = 3$ a $4,5$ mm ale také k naopak nepatrnému zlepšení parametrů ovlivňujících parotěsnost u posuvu $f_z = 6$ mm.

Porovnání samotných reprezentativních profilů v závislosti na měnících se řezných podmínkách v_c a f_z je provedeno v příloze na obr.P5-15 a P5-16, kapitola P-5.5.

9.2.2.3 Celkové silové zatížení – IN2010

Na **obr.9-21** je zobrazena závislost celkového silového zatížení řezného procesu na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu V a změně řezné rychlosti v_c pro IN2010. Z grafu vyplývá, že celková síla se zvyšuje jak se zvyšující se řeznou rychlostí, tak také se zvětšujícím se objemem odebraného materiálu. V porovnání s IN2004 zde nárůst v závislosti na v_c není tak markantní, to je způsobeno tím, že řezná rychlost se v případě IN2010 zvýšila pouze o 50%, ze 150 m/min na 226 m/min. V případě IN2004 to bylo o 100% (150 m/min → 300 m/min).



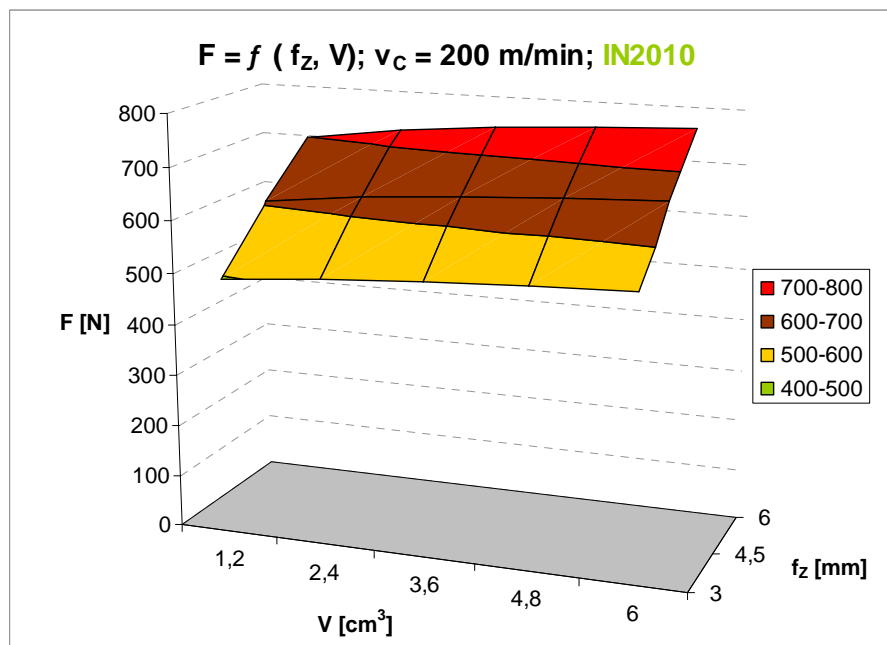
Obr.9-21 Závislost celkového silového zatížení F na řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu V pro IN2010; $f_z = 4,5$ mm

Také v tomto případě byla stanovena závislost pro celkové silové zatížení VBD typu IN2010 na změně v_c a V . Zjištěná závislost je vyjádřena pomocí rovnice **R-13**.

$$F_{IN2010} = 99 \cdot v_C^{0,3252} \cdot V^{0,0449} [N] \quad (R-13)$$

Výsledky statistické analýzy a vyrovnání závislostí celkového silového zatížení F pro IN2010 při změně v_C jsou uvedeny v příloze v kapitole P-5.5, tab.P5-7.

Grafické znázornění závislosti velikosti celkového silového zatížení F na změně posuvu f_Z a objemu odebraného materiálu V pro IN2010 je na **obr.9-22**. Jak je z grafu patrné, silové zatížení se zvětšuje se zvětšující se hodnotou f_Z . Při vyšší hodnotě f_Z se zvětší průřez odřezávané vrstvy. Tento vliv je velmi výrazný. Vliv opotřebení (objemu odebraného materiálu) je podobný pro všechny hodnoty f_Z .



Obr.9-22 Závislost celkového silového zatížení F na změně posuvu f_Z a objemu odebraného materiálu V pro IN2010; $v_C = 200$ m/min

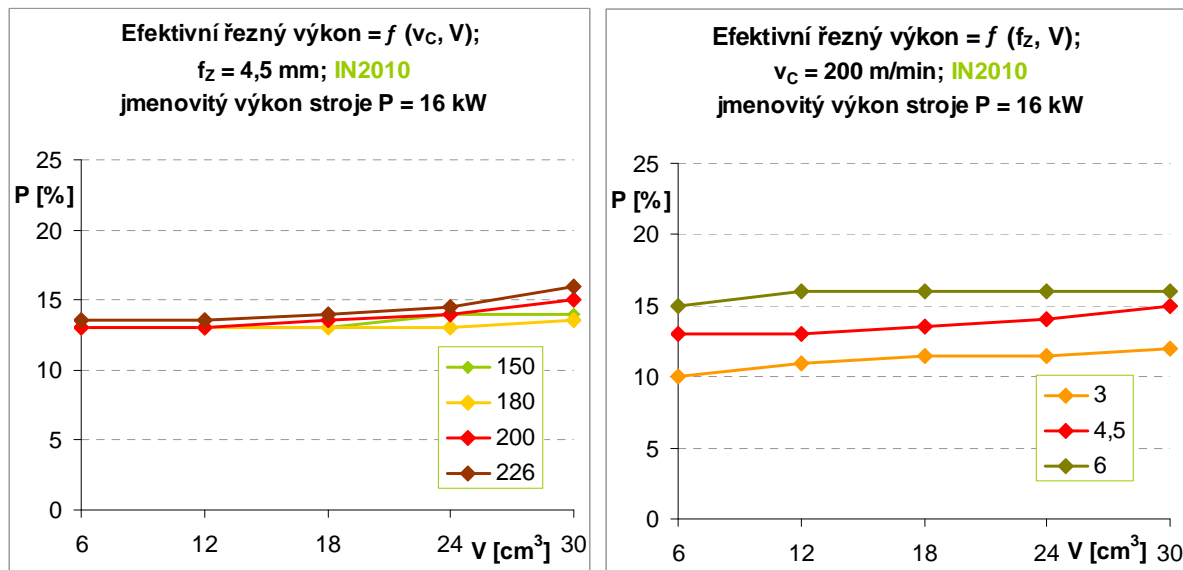
Zjištěná závislost pro celkové silové zatížení VBD IN2010 na změně f_Z a V je vyjádřena pomocí rovnice **R-14**.

$$F_{IN2010} = 277 \cdot f_Z^{0,4952} \cdot V^{0,0539} [N] \quad (R-14)$$

Výsledky statistické analýzy a vyrovnání závislostí celkového silového zatížení F pro IN2010 při změně f_Z jsou uvedeny v příloze v kapitole P-5.5, tab.P5-8.

9.2.2.4 Efektivní řezný výkon – IN2010

Z hlediska výkonových charakteristik řezného procesu, které jsou zobrazeny v grafech na **obr.9-23**, je možné dojít k následujícím závěrům: vliv zvyšující se řezné rychlosti v_C je téměř zanedbatelný; vliv posuvu f_Z je jednoznačný – se zvyšujícím se posuvem narůstá efektivní řezný výkon, neboť se výrazně mění průřez odřezávané vrstvy a tím i silové zatížení.



Obr.9-23 Efektivní řezný výkon v závislosti na objemu odebraného materiálu, změně řezné rychlosti v_c (vlevo) a posuvu f_z (vpravo); IN2010

Silové zatížení narůstá se zvyšujícím se objemem odebraného materiálu, čili se zvětšujícím se opotřebením. Proto se také hodnoty efektivního řezného výkonu zvyšují v závislosti na zvětšujícím se objemu odebraného materiálu. Tento nárůst je ale také nepatrný.

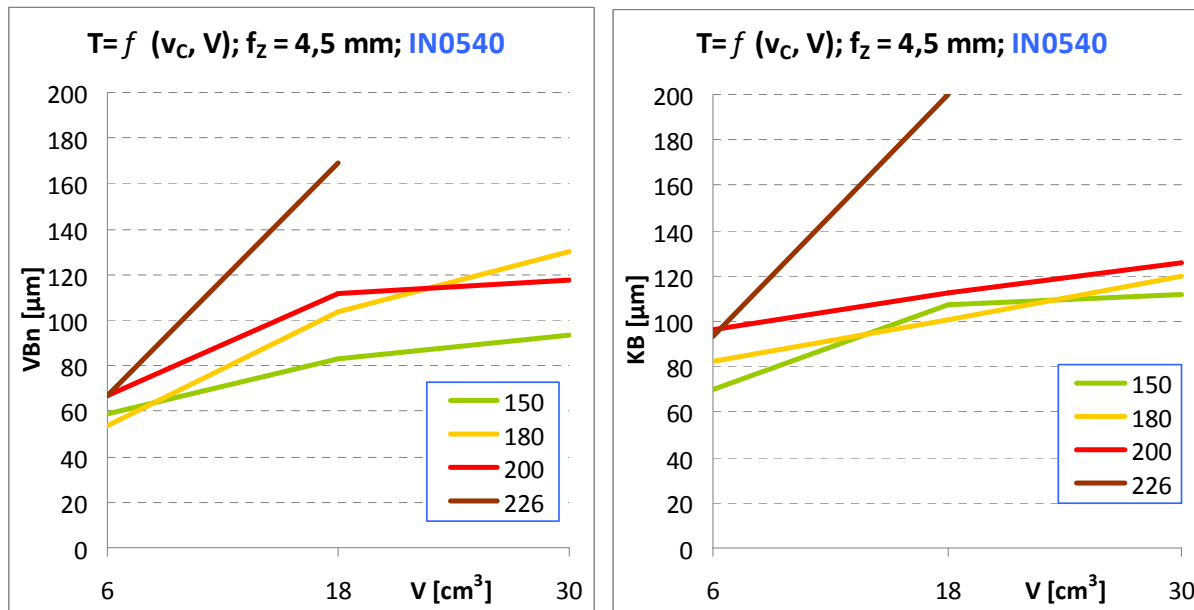
9.2.3 IN0540

V tomto případě se jedná o slinutý karbid povlakovaný vrstvou TiN. Tento řezný materiál se v současnosti používá v reálném procesu. Poloměr zaoblení ostří r_N je přibližně 11 μ m.

9.2.3.1 Trvanlivost – IN0540

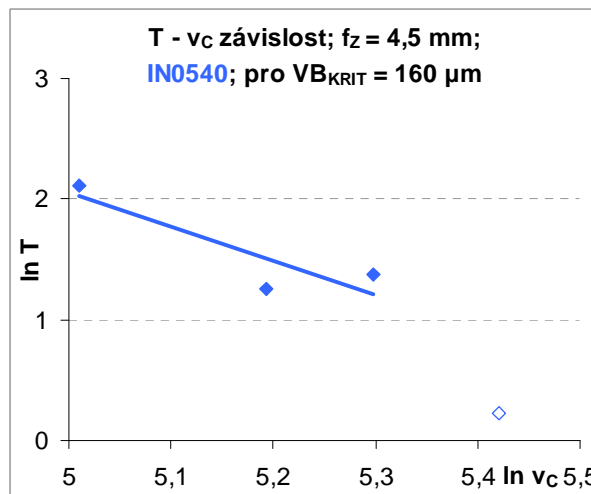
Na **obr.9-24** je provedeno porovnání opotřebení na hřbetě (vlevo) a na čele (vpravo) v závislosti na změně řezné rychlosti v_c a zvyšujícím se objemu odebraného materiálu V . Je zde patrný vliv řezné rychlosti na průběhy opotřebení. Z grafů vyplývá, že se zvyšující se řeznou rychlostí se zvětšuje opotřebení nástroje. VBD se opotřebovaly přibližně rovnoměrně jak na hřbetě, tak na čele. Také zde se z hlediska opotřebení nástroje jevila jako nejméně vhodná řezná rychlost $v_c = 226$ m/min. Při této hodnotě bylo dokonce jako v jediném případě dosaženo stanovené kritériální hodnoty opotřebení 0,2 mm.

Porovnání opotřebení VBD pro jednotlivé řezné rychlosti je v příloze v **kap.P-5.6, tab.P5-9**. Ve většině případů je zobrazen stav po obrobení 30cm³, výjimkou je pouze $v_c = 226$ m/min. Nástroj se vždy začal opotřebovávat abrazivní formou rovnoměrně v celé délce ostří. Také se, zejména při vyšších řezných rychlostech, začal objevovat výrazný nárůstek. V porovnání s IN2004 a IN2010 se IN0540 opotřeboval celkově intenzivněji. To je pravděpodobně způsobeno zejména použitým povlakem. VBD typu IN2004 a IN2010 jsou povlakovány vrstvami AlTiN a TiAlN, zatímco IN0540 vrstvou TiN. Původně vyvinuté a historicky nejstarší vrstvy TiN dosahují tvrdosti do HV = 23GPa. Vrstvy TiAlN mají tvrdost až HV = 33 GPa a také se vyznačují značnou odolností proti abrazivnímu opotřebení. TiN bohužel tak vysokou odolnost nemají [75]. Určitý vliv na opotřebení může mít také vyšší obsah kobaltu v IN0540, v porovnání s IN2004 a IN2010.



Obr.9-24 Opotřebení nástroje na hřbetě (VB_n) a na čele (KB) v závislosti na změně řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu V ; $f_z = 4,5 \text{ mm}$; **IN0540**

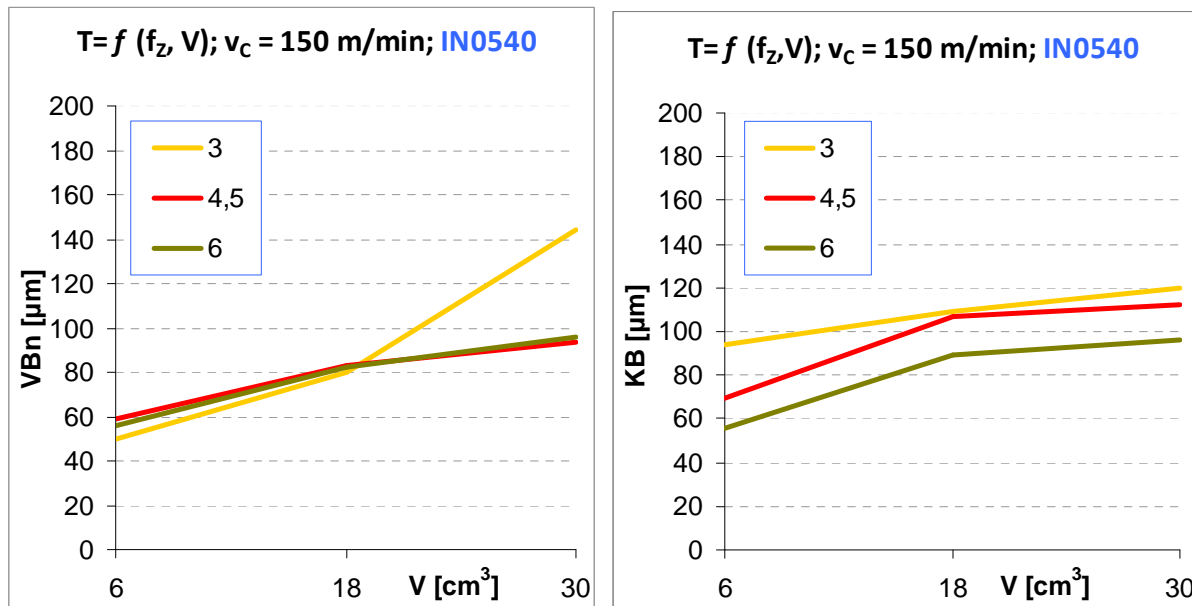
Byla také stanovena T - v_c závislost viz **obr.9-25**. Pomocí této závislosti byl následovně stanoven Taylorův vztah (**R-15**). Totožně jako v případě IN2004 a IN2010 také zde nebyla $v_c = 226 \text{ m/min}$ do závislosti zahrnuta. V tomto případě se také jednalo o okrajovou hodnotu. Zobrazená T - v_c závislost tedy platí v celém intervalu.



Obr.9-25 T - v_c závislost pro **IN0540**; $f_z = 4,5 \text{ mm}$; $VB_{KRIT} = 160 \mu\text{m}$

$$T_{\text{IN0540}} = \frac{10,3 \cdot 10^6}{v_c^{2,8}} [\text{min}] \quad (\text{R-15})$$

Na **obr.9-26** je provedeno porovnání opotřebení nástroje v závislosti na změně posuvu f_z a zvětšujícímu se objemu odebraného materiálu V . V případě opotřebení na hřbetě VB_n je do hodnoty $V = 18 \text{ cm}^3$ vliv posuvu téměř zanedbatelný. Tento vliv se projevil později. Při $f_z = 3 \text{ mm}$ došlo k velmi rychlému opotřebení VBD. Z hlediska opotřebení na čele je vliv posuvu f_z zřejmý. Čím menší je hodnota posuvu, tím větší je opotřebení. To je (stejně jako u IN2004 a IN2010) způsobeno tím, že čím menší je posuv, tím déle je nástroj namáhán.

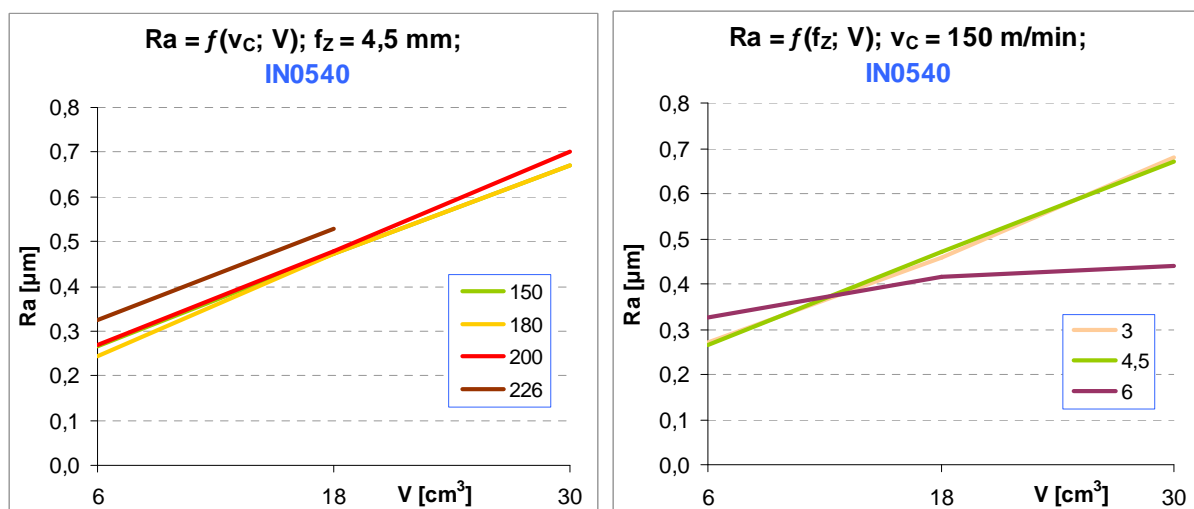


Obr.9-26 Opotřebení nástroje na hřbetě (VBn) a na čele (KB) v závislosti na změně posuvu f_z a objemu odebraného materiálu V ; $v_c = 150$ m/min; IN0540

Porovnání opotřebení VBD pro jednotlivé hodnoty f_z je v příloze v *kap.P-5.6*, tab.*P5-10*. Ve všech případech je zobrazen stav po obrobení 30cm^3 .

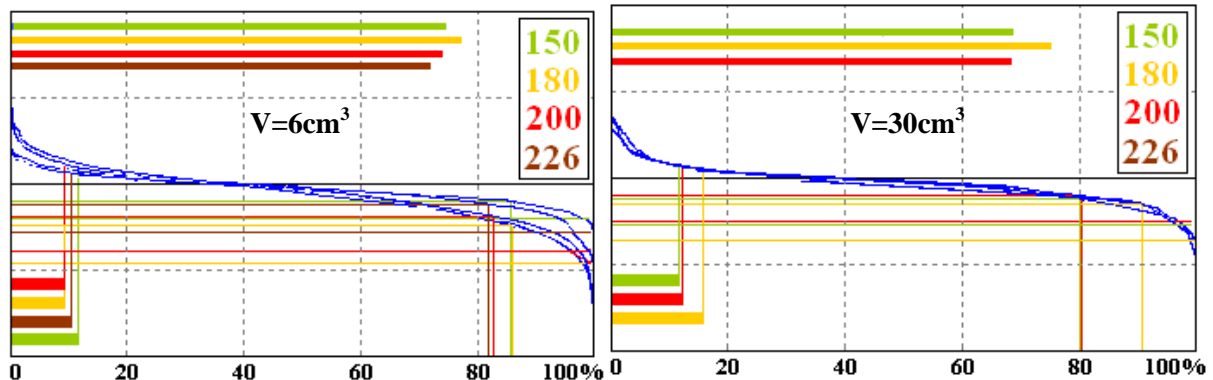
9.2.3.2 Drsnost obrobeného povrchu a nosný podíl profilu – IN0540

Vliv změny samotné řezné rychlosti v_c na drsnost obrobeného povrchu při frézování s VBD IN0540 je, až do hodnoty $v_c = 200$ m/min včetně, zanedbatelný. Průběhy pro jednotlivé sledované hodnoty v_c jsou téměř totožné. K pozorovatelnému rozdílu ale dochází při $v_c = 226$ m/min. To je způsobeno větším opotřebováním nástroje při této hodnotě v_c . Výrazný vliv na dosaženou drsnost má ale opotřebování nástroje VB_N . Jak je z grafu na *obr.9-27* patrné, v závislosti na objemu odebraného materiálu (čili zvyšujícím se opotřebováním) se hodnota drsnosti obrobeného povrchu R_a zhoršila o více než 100% bez ohledu na hodnotu sledované v_c . Z praktického hlediska je nevhodné, aby měla obráběná plocha na počátku $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ a na konci $R_a = 0,7 \mu\text{m}$ ačkoliv nebylo dosaženo kritériální hodnoty $R_a = 0,8 \mu\text{m}$.



Obr.9-27 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na objemu odebraného materiálu při změně řezné rychlosti v_c (vlevo) a změně posuvu f_z (vpravo); IN0540

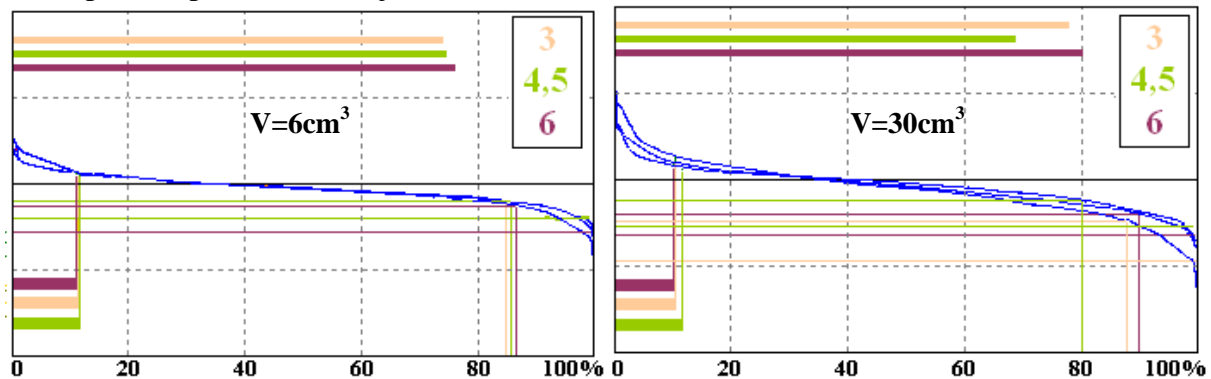
Vliv posuvu f_z na R_a je v tomto případě spíše odrazem jeho vlivu na opotřebení. Nejméně se břit opotřeboval při $f_z = 6$ mm, proto se také R_a nezhoršuje tak intenzivně. V příloze v kap. P-5.6 na obr. P5-18 jsou pro doplnění zobrazeny totožné závislosti drsnosti obrobeneho povrchu, vyjádřené pomocí parametru R_z .



Obr.9-28 Porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části z hlediska parotěsnosti v závislosti na v_c ; $f_z = 4,5$ mm, $V = 6\text{cm}^3$; IN0540

Porovnáním nosného podílu profilu a jeho kritické části pro jednotlivé v_c viz **obr.9-28** není jednoduché provést nějaké závěry. Z hlediska podílu kritické části se jeví jako nejlepší $v_c = 200$ m/min, také je ale při této hodnotě v_c dosaženo nejmenšího podílu nosného profilu (kromě $v_c = 226$ m/min - tato v_c neobstála z hlediska trvanlivosti). Zvětšující se objem odebraného materiálu (neboli opotřebení) má na vlastnosti nosného profilu obdobný vliv jako na R_a . Dochází k celkovému zhoršení.

Vliv posuvu f_z je zobrazen v grafech na **obr.9-29**. Ačkoli hodnota R_a se zvyšuje (viz **obr.9-27**), procentuální podíl kritické části se nikterak nezvyšuje a je pro všechny hodnoty posuvu téměř totožný. Z hlediska parotěsnosti není až tak důležité, jak vysoké jsou extrémní vrcholky profilu, ale kolik procent povrchu zabírají.

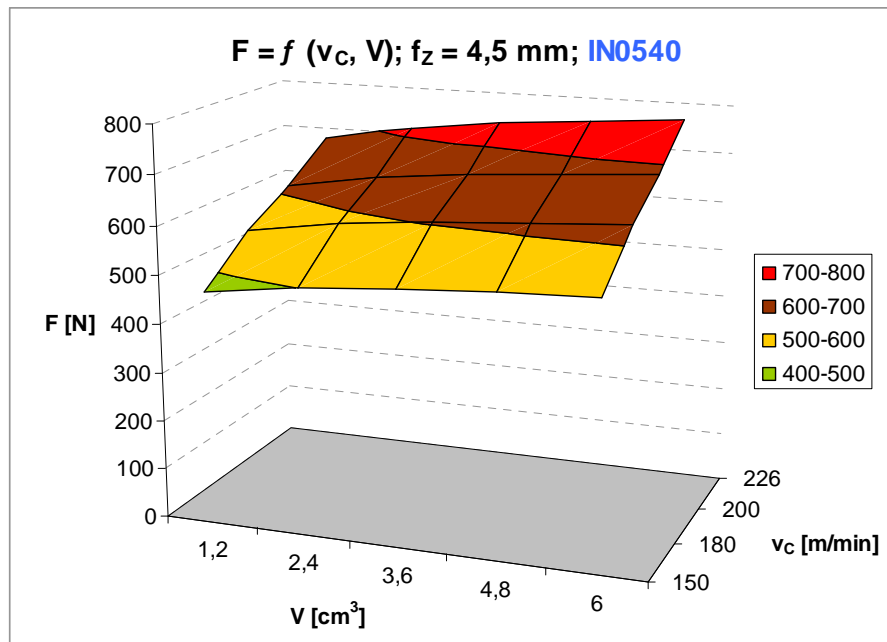


Obr.9-29 Porovnání nosného podílu profilu a jeho kritické části z hlediska parotěsnosti v závislosti na f_z ; $v_c = 150\text{m/min}$, $V = 6\text{cm}^3$; IN0540

Porovnání samotných reprezentativních profilů v závislosti na měnicích se řezných podmínkách v_c a f_z je provedeno v příloze na **obr.P5-19** a **P5-20**, **kap.P-5.6**.

9.2.3.3 Celkové silové zatížení – IN0540

Z hlediska silového zatížení platí pro IN0540 totožné závěry, jako pro ostatní řezné materiály. Se zvyšující se řeznou rychlostí narůstá celkové silové zatížení. Průběh silového zatížení v závislosti na řezném procesu je zobrazen na **obr.9-30**. V tomto případě navíc docházelo k výraznějšímu opotřebení již od samého počátku obrábění, což se také oproti ostatním řezným materiálům projevovalo výrazněji na silovém zatížení.



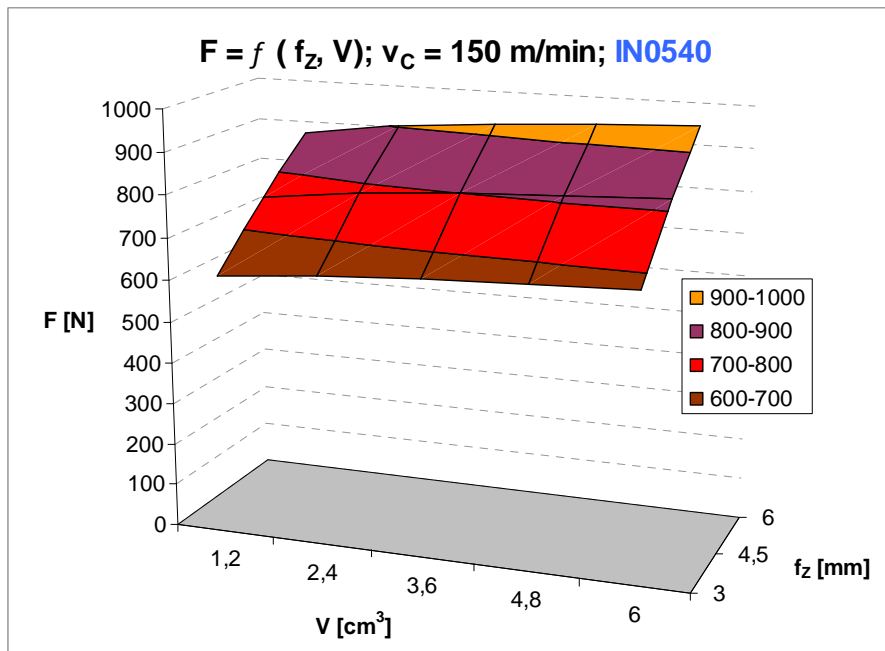
Obr.9-30 Závislost celkového silového zatížení F na řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu V pro IN0540; $f_z = 4,5$ mm

Zjištěná závislost pro silové zatížení VBD IN0540 na změně v_c a V je vyjádřena pomocí rovnice **R-16**.

$$F_{IN0540} = 6 \cdot v_c^{0,8622} \cdot V^{0,0743} [N] \quad (R-16)$$

Výsledky statistické analýzy a vyrovnání závislostí celkového silového zatížení F pro IN0540 při změně v_c jsou uvedeny v příloze v kapitole **P-5.6**, **tab.P5-11**.

Také pro vliv posuvu f_z platí stejné závěry jako v případě ostatních řezných materiálů. Se zvětšujícím se posuvem f_z se zvyšuje i celkové silové zatížení. Není zde však patrný takový nárůst v závislosti na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu. To je způsobeno tím, že vliv posuvu byl sledován za nejnižší řezné rychlosti $v_c = 150$ m/min. Při této řezné rychlosti se v porovnání s ostatními řeznými rychlostmi VBD opotřebovávala nejméně. Průběh celkového silového zatížení v závislosti na změně posuvu f_z a objemu odebraného materiálu V je zobrazen v grafu na **obr.9-31**.



Obr.9-31 Závislost celkového silového zatížení F na změně posuvu f_z a objemu odebraného materiálu V pro IN0540; $v_c = 150 \text{ m/min}$

Zjištěná závislost pro celkové silové zatížení VBD IN0540 na změně f_z a V je vyjádřena pomocí rovnice **R-17**.

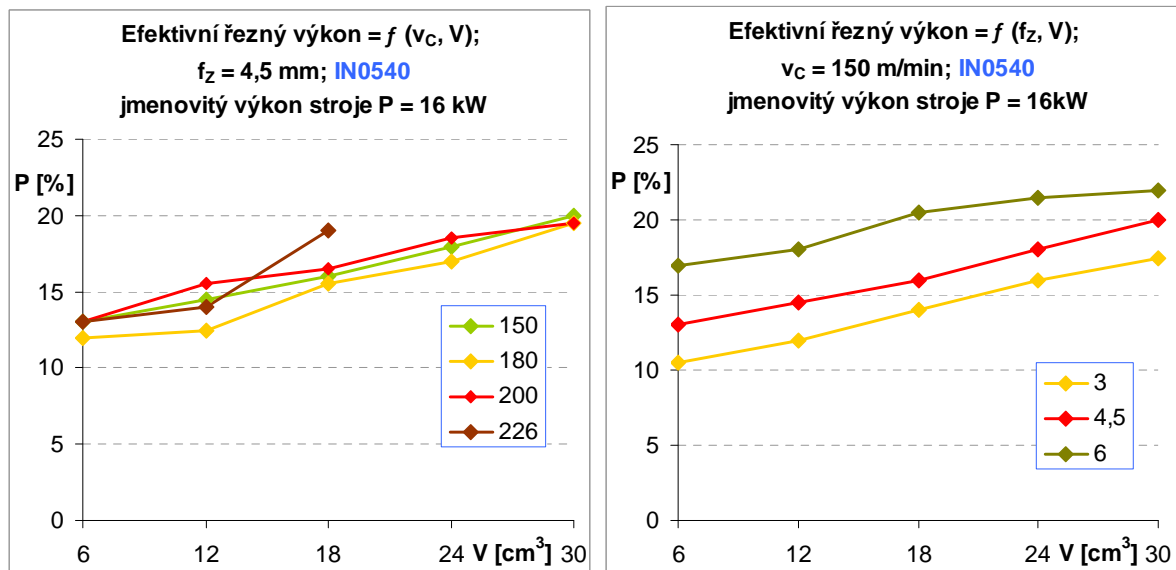
$$F_{IN0540} = 350 \cdot f_z^{0,4903} \cdot V^{-0,0505} [N] \quad (\text{R-17})$$

Výsledky statistické analýzy a vyrovnání závislostí celkového silového zatížení F pro IN0540 při změně f_z jsou uvedeny v příloze v kapitole P-5.6, tab.P5-12.

9.2.3.4 Efektivní řezný výkon – IN0540

Ze všech testovaných řezných materiálů se v případě IN0540 měnil efektivní řezný výkon v průběhu obrábění nejvíce. Jak je z grafu na **obr.9-32** patrné, při všech testovaných řezných podmínkách vzrostla jeho hodnota v závislosti na objemu odebraného materiálu o 50% až 70%. To má přímou souvislost s opotřebením nástroje. Čím větší je opotřebení, tím větší je silové zatížení nástroje a tím větší je efektivní řezný výkon na vřetení stroje.

V závislosti na změně řezné rychlosti (vlevo) je patrné, že se hodnota efektivního řezného výkonu pohybuje v úzkém intervalu a hodnota v_c má na něj vliv opět spíše přes opotřebení. Co se vlivu f_z na efektivní řezný výkon týče, ten je jednoznačný. Čím vyšší je hodnota posuvu, tím vyšší je silové zatížení a tím vyšší je výkon.



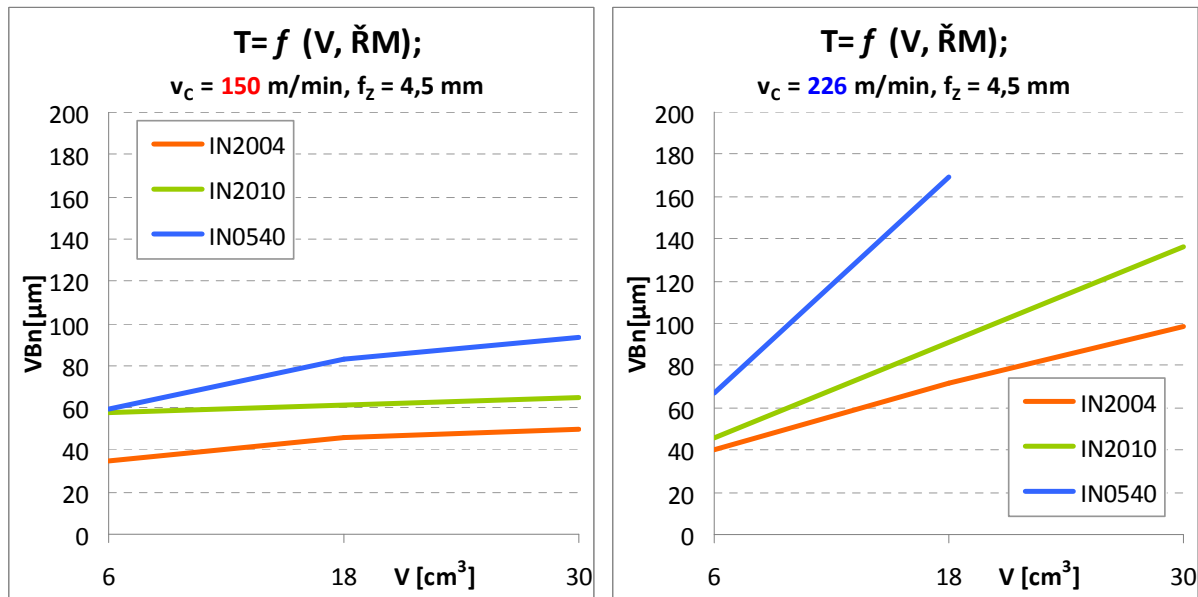
Obr.9-32 Efektivní řezný výkon v závislosti na objemu odebraného materiálu V , změně řezné rychlosti v_c (vlevo) a posuvu f_z (vpravo); IN0540

9.2.4 Celkové porovnání

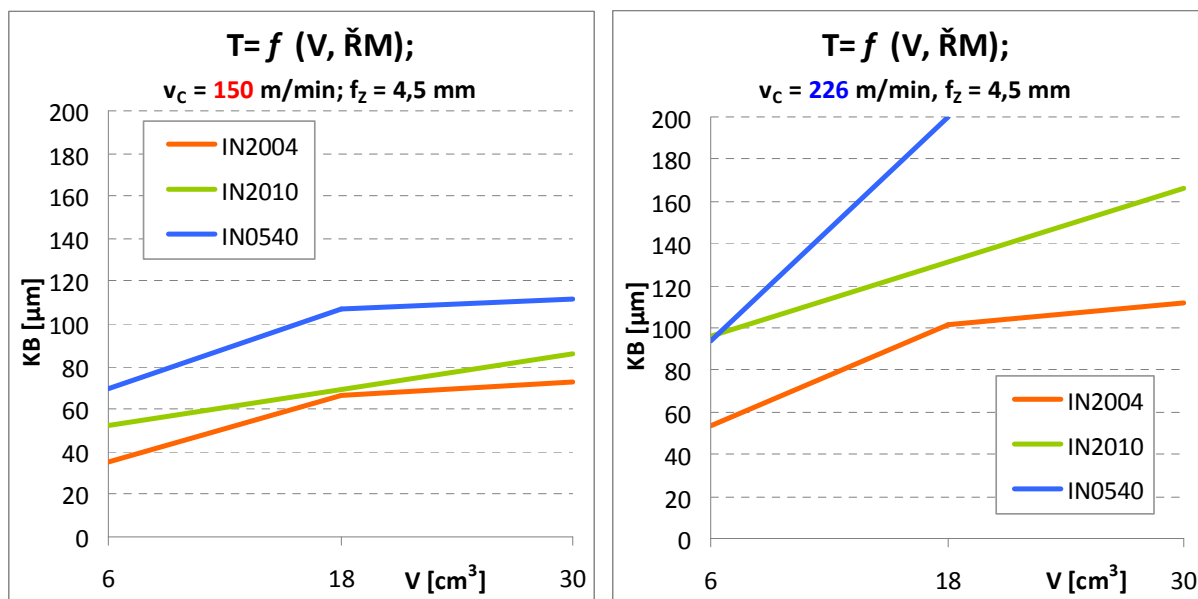
Porovnáním řezných podmínek (*tab.9-3, kap.9.2*), za kterých byly jednotlivé VBD testovány je zřejmé, že celkové vzájemné srovnání jednotlivých typů VBD je možné provést pouze při konstantní hodnotě posuvu $f_z = 4,5 \text{ mm}$ a řezných rychlostech $v_c = 150$ a 226 m/min .

9.2.4.1 Trvanlivost

Nejlepších výsledků z hlediska trvanlivosti bylo dosaženo s VBD typu IN2004. Ta se opotřebovávala nejméně, jak na hřbetě, tak také na čele. Nejhorších výsledků bylo dosaženo s VBD typu IN0540. IN0540 je povlakován vrstvou TiN, zatímco IN2004 vrstvou AlTiN a IN2010 vrstvou TiAlN. Porovnání vlastností vrstev TiN a TiAlN bylo popsáno v kapitole 9.2.3.1. Vrstva AlTiN, použitá u IN2004, má oproti TiAlN vyšší obsah Al než Ti. Tím dosahuje vyšší odolnost proti oxidaci [81]. Vrstvy AlTiN se vyznačují poměrem Al:Ti – 60:40 až 75:25 [75]. Pokud je ale tento poměr 60:40, dosahuje vrstva AlTiN dokonce vyšší tvrdosti než TiAlN [82]. Proto se z hlediska trvanlivosti choval nejlépe IN2004. Karbid IN0540 také obsahuje v porovnání s IN2004 a IN2010 vyšší procento kobaltu. Vliv obsahu kobaltu na vlastnosti slinutého karbidu byl popsán v kapitole 8.2.1 (předdokončování). Všechny VBD se více opotřebovávaly na čele. Také se více opotřebovávaly se zvyšující se řeznou rychlostí. Navíc bylo zjištěno, že řezná rychlost $v_c = 226 \text{ m/min}$ je sledovaných podmínek nevhodná pro obrábění oceli P91. Tato rychlost spadá do oblasti vzniku nárůstku, která je pro obrábění korozivzdorných ocelí typická. Velikost a průběh opotřebení na hřbetě pro jednotlivé VBD je zobrazeno na *obr.9-33*. Obdobné porovnání, sledující opotřebení na čele je na *obr.9-34*. Porovnání opotřebení pro jednotlivé typy VBD je v příloze v tabulkách P5-13 (čelo) a P5-14 (hřbet), *kap.P-5.7*.



Obr.9-33 Porovnání závislostí opotřebení na hřbetě nástroje VB_n na objemu odebraného materiálu V pro jednotlivé karbidy; $v_c = 150 \text{ m/min}$ (vlevo) a $v_c = 226 \text{ m/min}$ (vpravo); $f_z = 4,5 \text{ mm}$

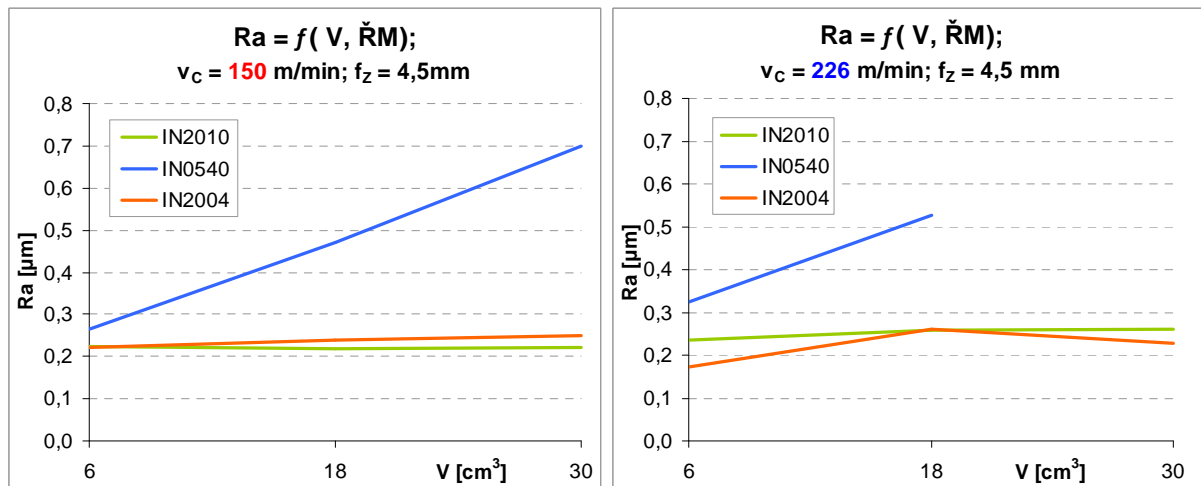


Obr.9-34 Porovnání závislostí opotřebení na čele nástroje KB na objemu odebraného materiálu V pro jednotlivé karbidy; $v_c = 150 \text{ m/min}$ (vlevo) a $v_c = 226 \text{ m/min}$ (vpravo); $f_z = 4,5 \text{ mm}$

9.2.4.2 Drsnost obrobeného povrchu a nosný podíl profilu

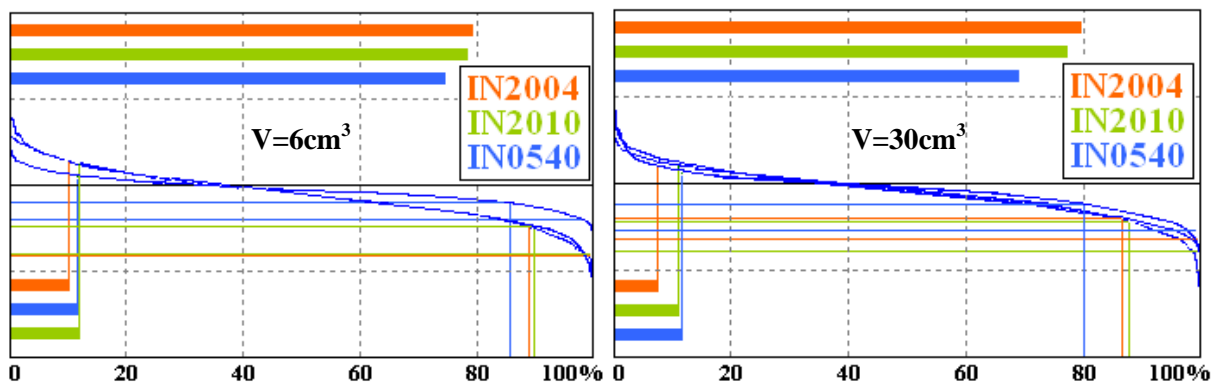
Nejlepších výsledků z hlediska hodnocení drsnosti obrobeného povrchu bylo dosaženo ve shodě u VBD typu IN2004 a IN2010. V případě parametru R_a nebyla u těchto VBD překročena hodnota $0,3 \mu\text{m}$. Drsnost se navíc téměř neměnila v závislosti na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu V . IN0540 se jeví jako nejméně vhodný z testovaných typů VBD pro obrábění oceli P91. U této VBD docházelo ke značnému zhoršení drsnosti v závislosti na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu V . To je pro praktické nasazení nevhodné.

V příloze v *kap.P-5.7* na *obr.P5-21* jsou pro doplnění zobrazeny totožné závislosti drsnosti obrobeného povrchu, vyjádřené pomocí parametru R_z .

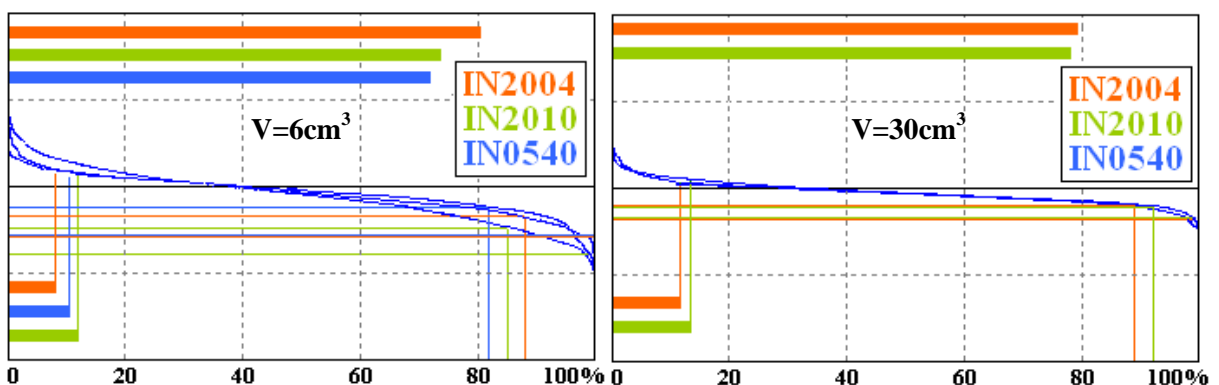


Obr.9-35 Porovnání závislosti drsnosti obrobeneho povrchu R_a na objemu odebraného materiálu V pro jednotlivé karbidy; $v_c = 150$ m/min (vlevo) a $v_c = 226$ m/min (vpravo); $f_z = 4,5$ mm

Porovnáním nosných podílů profilů pro jednotlivé typy VBD, které jsou provedeny v grafech na obr.9-36 a 9-37, nejlepší výsledky prokázal typ IN2004. Ten má ve všech případech největší podíl nosného profilu a nejmenší podíl kritické části v porovnání s ostatními typy VBD.



Obr.9-36 Porovnání nosného podílu profilu a kritické části z hlediska parotěsnosti v závislosti na $\check{R}M$; $v_c = 150$ m/min; $f_z = 4,5$ mm

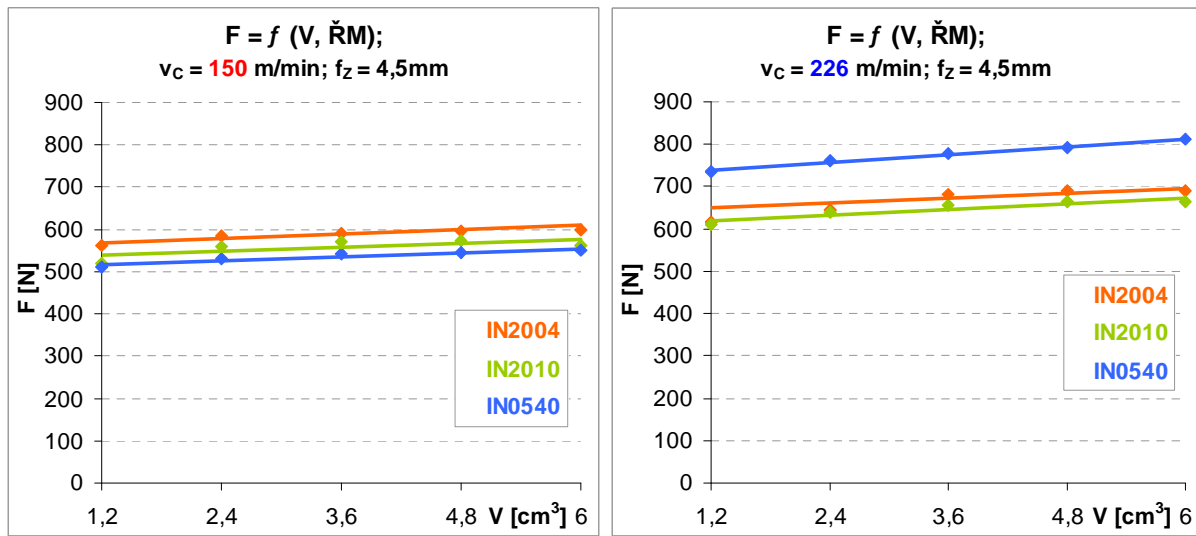


Obr.9-37 Porovnání nosného podílu profilu a kritické části z hlediska parotěsnosti v závislosti na $\check{R}M$; $v_c = 226$ m/min; $f_z = 4,5$ mm

9.2.4.3 Celkové silové zatížení

V případě porovnání průběhů celkového silového zatížení nástroje je patrné, že jsou zde nejmenší rozdíly mezi jednotlivými typy VBD. Je však nutné podotknout, že silové zatížení bylo hodnoceno

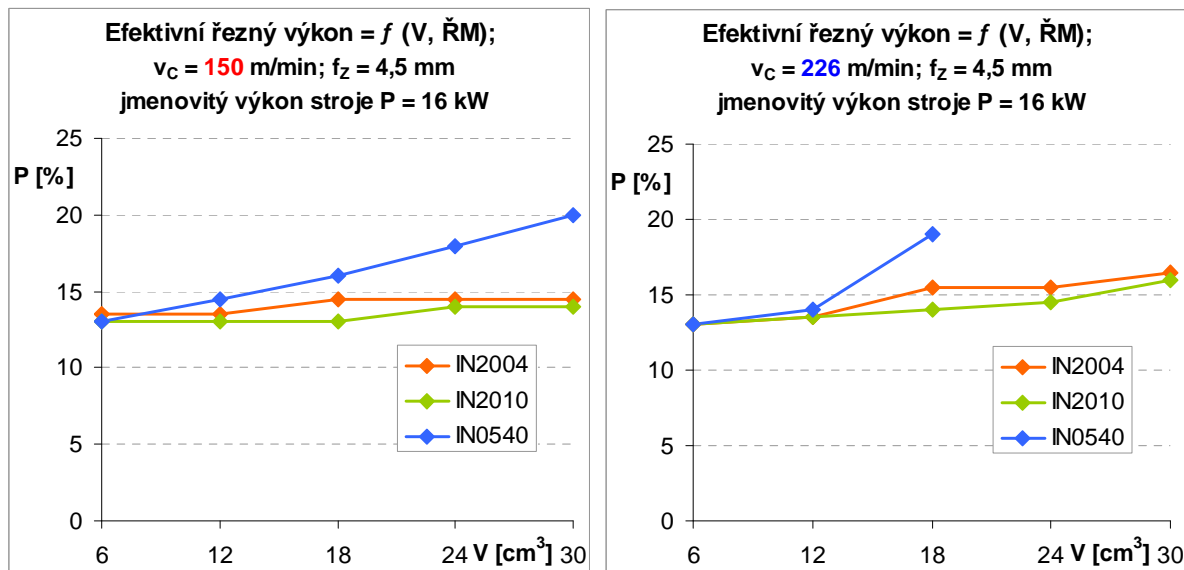
pouze v počáteční fázi řezného procesu, a to jen do hodnoty $V = 6 \text{ cm}^3$. Není proto možné z této veličiny vyvodit absolutní závěry. Při rychlosti $v_c = 150 \text{ m/min}$ bylo největšího silového zatížení dosaženo s IN2004 a nejnižšího s IN0540. To je možné vysvětlit tím, že při $v_c = 150 \text{ m/min}$ se VBD opotřebovávaly pozvolněji a rozdíly se projeví až po delší době obrábění. Pravděpodobně z počátku převládal vliv mikrogeometrie. Poloměr zaoblení ostří IN0540 byl přibližně $r_N = 11 \mu\text{m}$ a u IN2004 $r_N = 14 \mu\text{m}$. Ostřejší břit snadněji obrábí a dochází tak k menšímu silovému zatížení. Při $v_c = 226 \text{ m/min}$ již průběh silového zatížení u IN0540 ovlivnilo opotřebení. Také je možné si udělat představu o celkovém silovém zatížení pomocí sledování charakteristiky efektivního řezného výkonu. Platí, že čím vyšší jsou hodnoty řezných sil, tím větší je efektivní výkon na vřetení stroje.



Obr.9-38 Porovnání závislostí celkového silového zatížení F na objemu odebraného materiálu V pro jednotlivé karbidy; $v_c = 150 \text{ m/min}$ (vlevo) a $v_c = 226 \text{ m/min}$ (vpravo); $f_z = 4,5 \text{ mm}$

9.2.4.4 Efektivní řezný výkon

Charakteristiky efektivního řezného výkonu jsou pro obrábění s VBD typu IN2004 a IN2010 téměř totožné. V závislosti na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu se efektivní řezný výkon zvýší maximálně o 2 % (z jmenovitého výkonu stroje). V počáteční fázi bylo s IN0540 dosahováno obdobných hodnot. Avšak v průběhu obrábění došlo k nárůstu efektivního řezného výkonu o více než jednu čtvrtinu. Porovnání závislostí efektivního řezného výkonu stroje pro jednotlivé typy VBD je na *obr.9-39*.




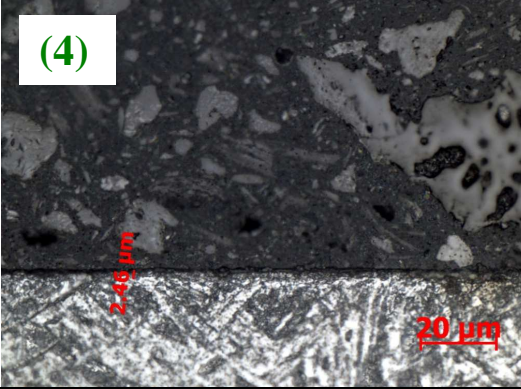
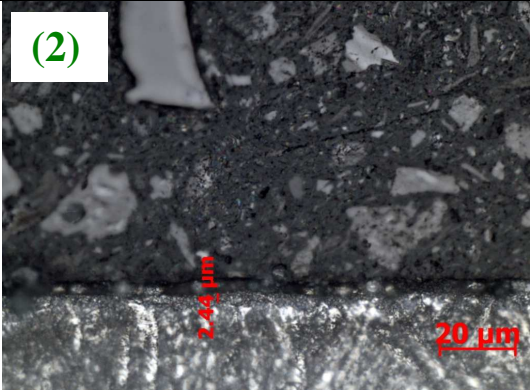
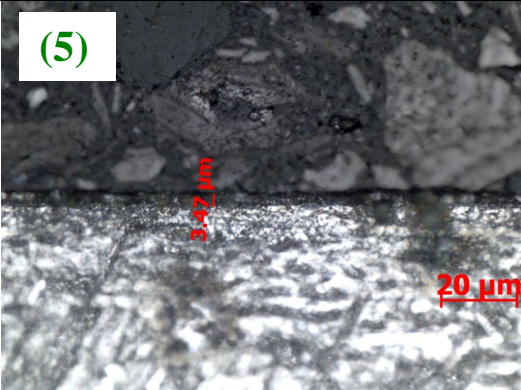

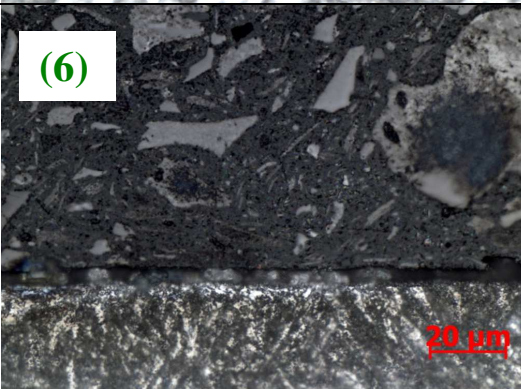
Obr.9-39 Porovnání závislosti efektivního řezného výkonu na objemu odebraného materiálu V pro jednotlivé karbidy; $v_c = 150 \text{ m/min}$ (vlevo) a $v_c = 226 \text{ m/min}$ (vpravo); $f_z = 4,5 \text{ mm}$

9.2.4.5 Zpevnění obrobeného povrchu a plošná drsnost

Také v případě dokončovacího frézování byl sledován vliv řezných podmínek a řezného materiálu na zpevnění obrobeného povrchu. Tato část přímo navazuje na kapitolu 8.2.6 (předdokončování). Jak bylo dříve vysvětleno, zpevnění obrobeného povrchu vzniklé v předchozí operaci může výrazně ovlivnit výsledky následující operace. V případě dokončovacího frézování byl nejprve obrobek předdokončen za vybraných řezných podmínek a poté byly nasazeny některé kombinace dokončovacích podmínek. Byl tedy sledován jak vliv samotných dokončovacích podmínek, tak také případný vliv předdokončovacích podmínek, které předcházely. Ačkoliv ve fázi předdokončovací byly pozorovány určité rozdíly v závislosti na použitém řezném materiálu a řezných podmínkách, ve fázi dokončovací tomu tak nebylo. Obrobený povrch se zpevňoval jen minimálně, bez ohledu na typ VBD, řezné podmínky, nebo předdokončovací podmínky. Z důvodu časové a materiálové náročnosti byl sledován pouze vliv některých „favorizovaných“ řezných podmínek. Pro lepší názornost jsou v **tab.9-4** uvedeny kombinace řezných podmínek a použitých řezných materiálů tak, jak po sobě následovaly. Získané snímky jsou uvedeny v **tabulce 9-5**.

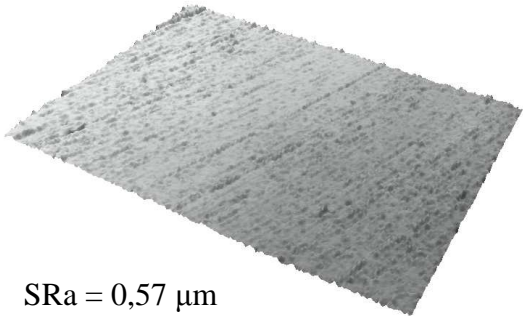
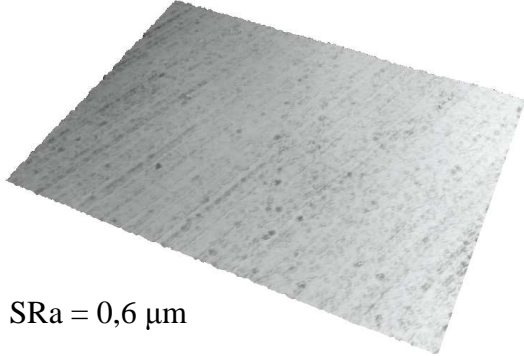
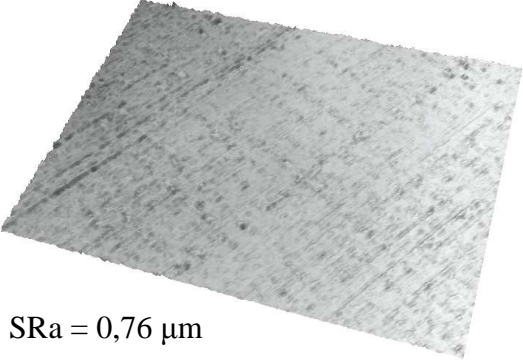
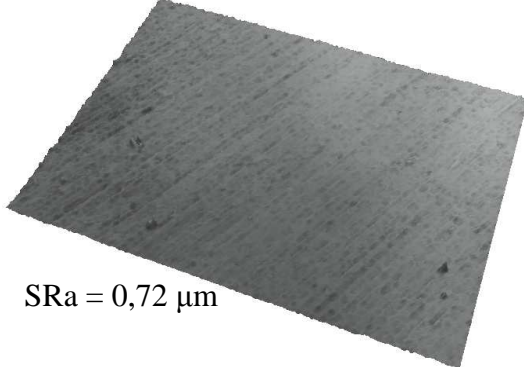
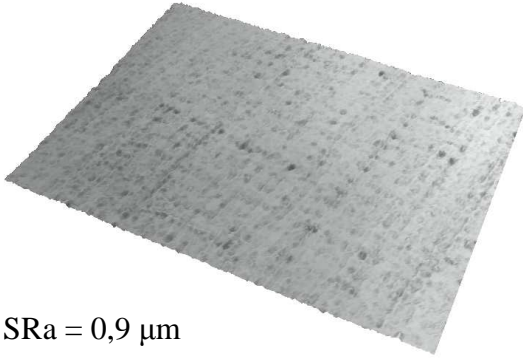
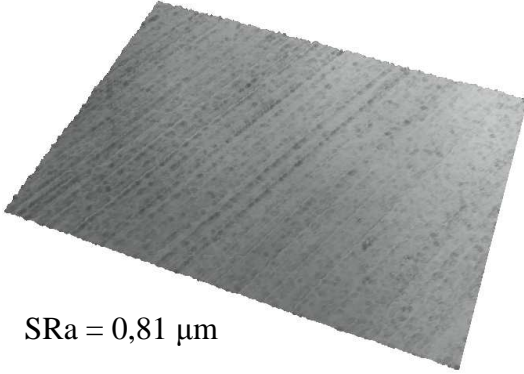
Předcházející řezné podmínky		IN2004 $v_c = 270 \text{ m/min}; f_z = 6 \text{ mm}$	IN2010 $v_c = 200 \text{ m/min}; f_z = 4,5 \text{ mm}$
PŘEDDO- KONČOVÁNÍ	IN2005; $v_c = 180 \text{ m/min}; f_z = 0,15 \text{ mm}$	ANO (1)	ANO (4)
	IN2004; $v_c = 180 \text{ m/min}; f_z = 0,15 \text{ mm}$	ANO (2)	ANO (5)
DOKON- ČOVÁNÍ	IN2004 $v_c = 270 \text{ m/min}; f_z = 6 \text{ mm}$	ANO (3)	NE
	IN2010 $v_c = 200 \text{ m/min}; f_z = 4,5 \text{ mm}$	NE	ANO (6)

Tab.9-4 Kombinace řezných podmínek při sledování zpevnění obrobeného povrchu

		IN2004 – I. $v_C = 270 \text{ m/min}; f_Z = 6 \text{ mm}$	IN2010 – II. $v_C = 200 \text{ m/min}; f_Z = 4,5 \text{ mm}$
Předcházející řezné podmínky	IN2004; $v_C = 180 \text{ m/min};$ $f_Z = 0,15 \text{ mm (P)}$	(1) 	(4) 
	IN2005; $v_C = 180 \text{ m/min};$ $f_Z = 0,15 \text{ mm (P)}$	(2) 	(5) 
	2x dokončovací podmínky I. a II.	(3) 	(6) 

Tab.9-5 Porovnání zpevnění obroběného povrchu po dokončování za vybraných podmínek

Před samotnou přípravou metalografických výbrusů byla na vzorcích změřena jejich plošná drsnost. Snímky povrchu a hodnoty **S_{Ra}** jsou zobrazeny v *tabulce 9-6*. Je možné pozorovat, že lepších povrchů bylo dosaženo v případech, kdy po předdokončování následovalo dokončování pouze v jedné hloubce řezu (bez opakování). V případě, kdy došlo k nasazení dokončovacích řezných podmínek několikrát po sobě, byl výsledný obroběný povrch nepatrně horší. Bohužel, bylo provedeno pouze malé množství náměrů, proto není vhodné stanovovat jakékoliv závěry a získané výsledky je nutno brát pouze jako informativní.

		IN2004 – I. $v_c = 270 \text{ m/min}; f_z = 6 \text{ mm}$	IN2010 – II. $v_c = 200 \text{ m/min}; f_z = 4,5 \text{ mm}$
Předcházející řezné podmínky	IN2004; $v_c = 180 \text{ m/min}; f_z = 0,15 \text{ mm (P)}$	 SRa = 0,57 μm	 SRa = 0,6 μm
	IN2005; $v_c = 180 \text{ m/min}; f_z = 0,15 \text{ mm (P)}$	 SRa = 0,76 μm	 SRa = 0,72 μm
	2x dokončovací podmínky I. a II.	 SRa = 0,9 μm	 SRa = 0,81 μm

Tab.9-6 Porovnání obrobených povrchů po dokončování za vybraných podmínek

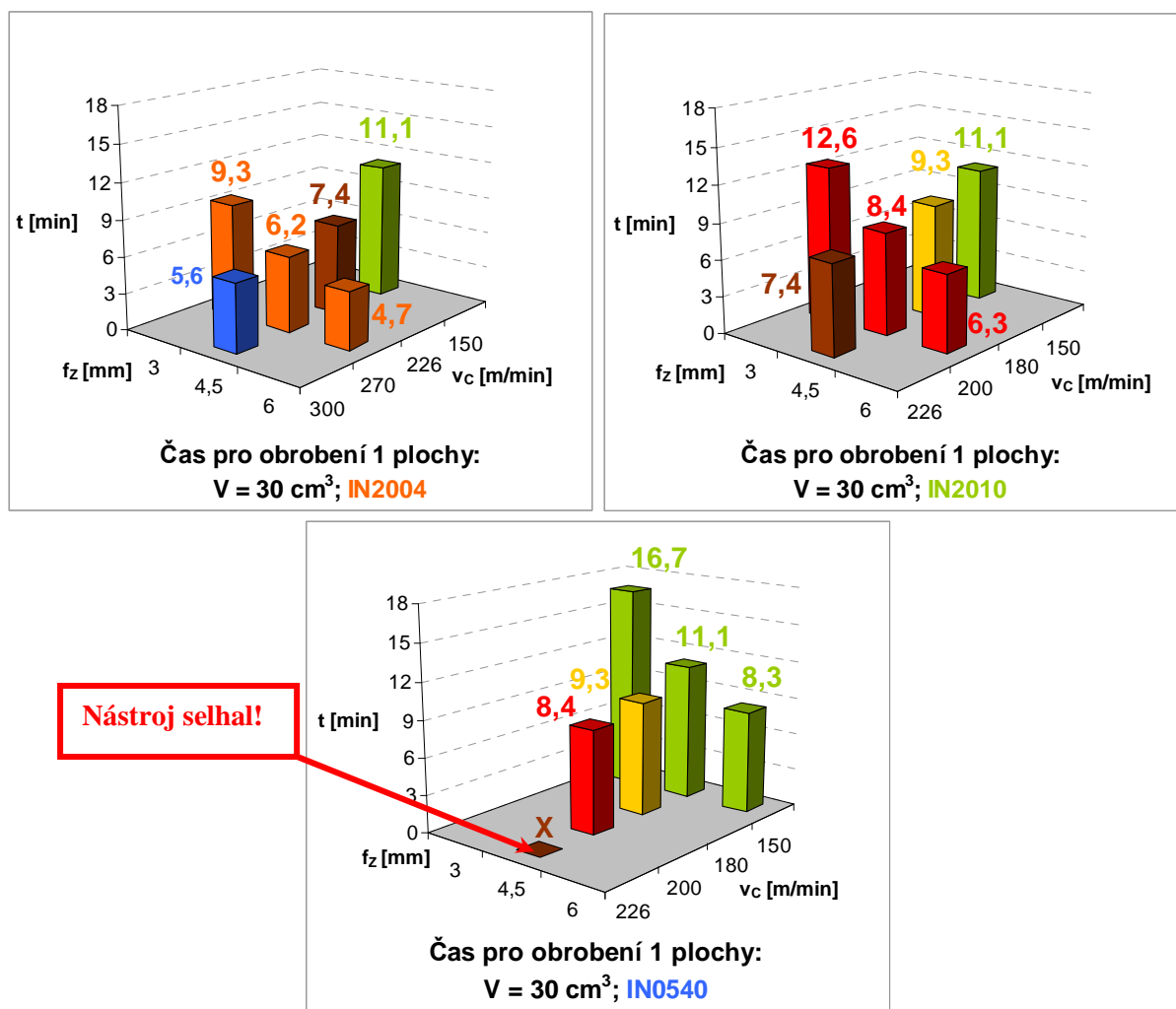
9.3 Závěr fáze dokončovacího obrábění

Z pre-experimentu (*kap.9.1*) vyšli jako „favorité“ VBD typu IN2004 a IN2010. Z důvodů popsaných v kapitole *9.1.6* byla mezi ně zařazena také VBD typu IN0540. Tyto tři typy ŘM byly hlouběji testovány v rámci samotného experimentu (*kap.9.2*).

Na rozdíl od fáze předdokončovací, byl zde každý typ testován za odlišných řezných podmínek (v_c a f_z), proto výsledné porovnání nebylo tak jednoznačné.

Byla stanovena dvě základní kritéria. Nástroj musí za daných řezných podmínek odebrat předepsaný objem materiálu $V = 30 \text{ cm}^3$, který odpovídá požadované ploše v reálném procesu a nesmí být překročena předepsaná hodnota drsnosti obrobeného povrchu $Ra = 0,8 \mu\text{m}$. Navíc bylo stanoveno jedno experimentální kritérium, a to velikost kritériálního opotřebení $VB_{KRIT} = 0,2 \text{ mm}$. Až na jedinou výjimku (u IN0540 při $v_c = 226 \text{ m/min}$) všechny testované materiály za všech kombinací testovaných řezných podmínek nepřekročily stanovené meze. Na *obr.9-40* je provedeno porovnání vlivu řezných podmínek na produktivitu, zde vyjádřenou časem potřebným pro obrobení požadované plochy. Tyto závislosti obecně odpovídají použitým řezným podmínkám, nicméně

volba řezných podmínek vychází z možností řezného materiálu. Pro stanovení celkových závěrů je nutné vzít v úvahu také kvalitativní hledisko.



Obr.9-40 Vliv řezných podmínek na produktivitu obrábění pro jednotlivé ŘM

Bylo zjištěno, že při $v_c = 226$ m/min se dostáváme do oblasti vzniku nárůstku. To platí pro všechny testované ŘM. Tato oblast je pro obrábění korozivzdorných ocelí typická. Ačkoliv může mít nárůstek někdy pozitivní vliv na proces obrábění, je k němu všeobecně přistupováno jako k negativnímu jevu. Vzniká-li nárůstek, stává se řezný proces nestabilní a nemůže být zaručeno splnění požadavků na něj kladených. Proto byla tato hodnota v_c z celkového hodnocení vyloučena jako nevhodná pro obrábění oceli P91.

Za ostatních řezných podmínek byly požadavky splněny, tzn. vždy bylo dosaženo požadovaného objemu odebraného materiálu V a nebyla překročena předepsaná drsnost obrobeného povrchu R_a . To neznamená, že všechny řezné materiály jsou vhodné pro tento testovaný typ operace. Důležitým požadavkem na obrobenou plochu je její parotěsnost. Ta je v první řadě závislá na rovinnosti obrobeného povrchu. To ale více než technologie ovlivní konstrukce a stav obráběcího stroje. Vliv na parotěsnost obrobeného povrchu má také stav obrobeného povrchu, zejména jeho drsnost. Nevhodné je, pokud na jedné obrobené ploše dochází v závislosti na objemu odebraného materiálu k výrazné změně stavu obrobeného povrchu. Tomu bylo uzpůsobeno hodnocení jednotlivých řezných materiálů, které je uvedeno v následující tabulce. Tato tabulka má dvě části. V horní části je provedeno porovnání a vyhodnocení z hlediska kvalitativního. Ve spodní části je rozšířeno o vyhodnocení z hlediska kvantitativního. Použitá metoda zpracování této tabulky je vysvětlena v příloze v kapitole **P-3.4**.

$f_z = 3-6 \text{ mm};$ $v_c = 150-300 \text{ m/min}$	IN2004					IN2010					IN0540				
	150	270			300	150	180	200			150			180	200
		3	4,5	6				3	4,5	6	3	4,5	6		
Trvanlivost	17	3	13	7	4	13	13	1	13	19	0	4	3	0	0
Drsnost	15	17	5	11	11	17	15	9	4	10	1	1	3	0	0
Nosný podíl profilu	16	19	7	16	2	7	14	1	15	0	5	6	7	2	5
Efekt.řez.výkon	15	16	14	8	11	16	18	18	14	12	10	6	4	5	6
Σ bodů	63	55	39	42	28	44	60	29	46	41	16	17	17	7	11
Pořadí	1.	3.	-	-	-	5.	2.	-	4.	-	-	-	-	-	-
Produktivita q	0,42	0,51	0,76	1	0,84	0,42	0,51	0,37	0,56	0,75	0,28	0,42	0,56	0,51	0,56
Σ bodů * q	26	28	31	42	24	18	31	11	26	31	4	7	9	4	6
Celk.pořadí	4.	3.	2.	1.	5.	-	2.	-	4.	2.	-	-	-	-	-

Tab.9-7 Hodnocení dosažených výsledků z hlediska kvality i kvantity

Již na první pohled je patrné, že VBD typu IN0540 v porovnání s IN2010 a IN2004 neuspěla. Tato VBD je pro dokončovací obrábění oceli P91 nejméně vhodná. V závislosti na objemu odebraného materiálu se nejrychleji opotřebovávala a tím se i výrazně zhoršovaly průběhy sledovaných charakteristik řezného procesu. Favorizované IN2004 a IN2010 jsou vhodné pro obrábění dělicí roviny tělesa parní turbíny. Bez ohledu na produktivitu se jako nejlepší řešení ukázalo aplikovat je spíše při nižší řezné rychlosti. Nižší řezná rychlost znamená vyšší trvanlivost, protože při nižších řezných rychlostech byla VBD méně namáhána a pomaleji se opotřebovávala. Velikost opotřebení má vliv na drsnost obrobeného povrchu. Čím menší je opotřebení, tím lepší je drsnost obrobeného povrchu. Z hlediska hodnocení drsnosti obrobeného povrchu bylo dosahováno nízkých hodnot, které se nijak výrazně neměnily v závislosti na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu či řezné rychlosti. To je způsobeno samotnou konstrukcí VBD. Jednalo se o hladicí VBD s tzv. „WIPER“ geometrií. Úkolem takové VBD je dosahovat co nejlepšího povrchu za všech možných řezných podmínek. Efektivní hodnota posuvu f_z je 4,5 mm. Při posuvu $f_z = 3$ mm se zvyšuje čas obrábění a tím je nástroj namáhán delší dobu. Břit se více opotřebovává a to se projeví na stavu obrobeného povrchu. Při posuvu $f_z = 6$ mm dochází k vyššímu silovému namáhání nástroje a zvyšuje se výkonová náročnost procesu. Hodnota $f_z = 4,5$ mm je proto kompromisem.

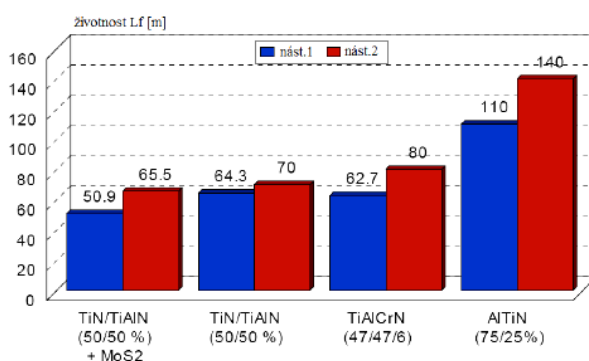
Velmi důležitým kritériem pro volbu řezných podmínek je produktivita. Z tohoto hlediska se hodnocení výsledků částečně mění. V tomto případě je nejvhodnější použít VBD typu IN2004. Hlavním důvodem je, že tento ŘM může díky svým vlastnostem pracovat za vyšších řezných podmínek aniž by docházelo ke zhoršování kvalitativních hledisek. Schopnost pracovat za těchto podmínek je zárukou produktivity. VBD je opatřena vrstvou AlTiN, která vykazuje lepší vlastnosti oproti vrstvě TiAlN u VBD typu IN2010. Nicméně VBD typu IN2010 je přesto konkurenceschopná a vyhovuje požadavkům kladených na tuto operaci.

10 Shrnutí výsledků

10.1 Diskuze výsledků

Jak bylo uvedeno v úvodní části této práce, poznatky z oblasti obrábění oceli P91 téměř nejsou. Během řešení nebyla nalezena jediná publikace zabývající se touto problematikou. Proto není možné provést absolutní konfrontaci získaných výsledků s výsledky jiných autorů či jiných pracovišť. Z tohoto důvodu budou výsledky porovnávány s obecnými závěry či závěry získanými při relativně podobných aplikacích.

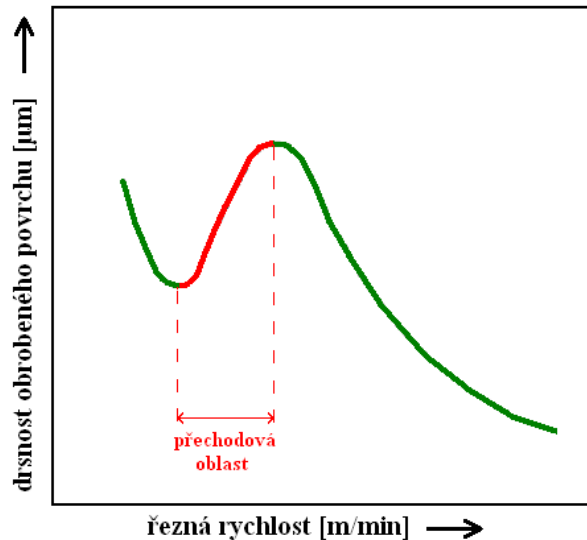
Při obrábění hraje důležitou roli produktivita a jedná-li se o finální operaci, tak také stav obrobeného povrchu. Nejdůležitějším činitelem, který řezný proces a jeho výsledky ovlivňuje je trvanlivost nástroje. Na trvanlivost nástroje má vliv celá řada faktorů. Patří mezi ně obráběný materiál, řezný materiál, konstrukce nástroje, záběrové podmínky, řezné podmínky a další. Některé tyto faktory není možné ovlivnit. Například obráběný materiál, který je jasně definován od samého počátku, nebo záběrové podmínky, které vycházejí z charakteru operace. Zpravidla bývá volba řezného materiálu závislá na obráběném materiálu a doporučení výrobce či zkušenostech. Nicméně mohou nastat situace, kdy je potřeba vhodnost řezného materiálu experimentálně vyzkoušet. Pro obrábění oceli P91, za testovaných podmínek, jsou vhodné povlakované VBD ze slinutých karbidů. S ohledem na charakter operace připadají v úvahu pouze frézovací hlavy velkých průměrů, osazené VBD. Substrát SK by měl obsahovat nízké procento kobaltu. ŘM dosahuje lepších výsledků, je-li povlakován vhodnou vrstvou. Jako nejvhodnější se osvědčil systém AlTiN. Vliv použité vrstvy na trvanlivost nástroje je možné porovnat na *obr. 10-1*.



Obr.10-1 Vliv povlaku na životnost nástroje při vrtání chrom-molybdenové oceli [82]

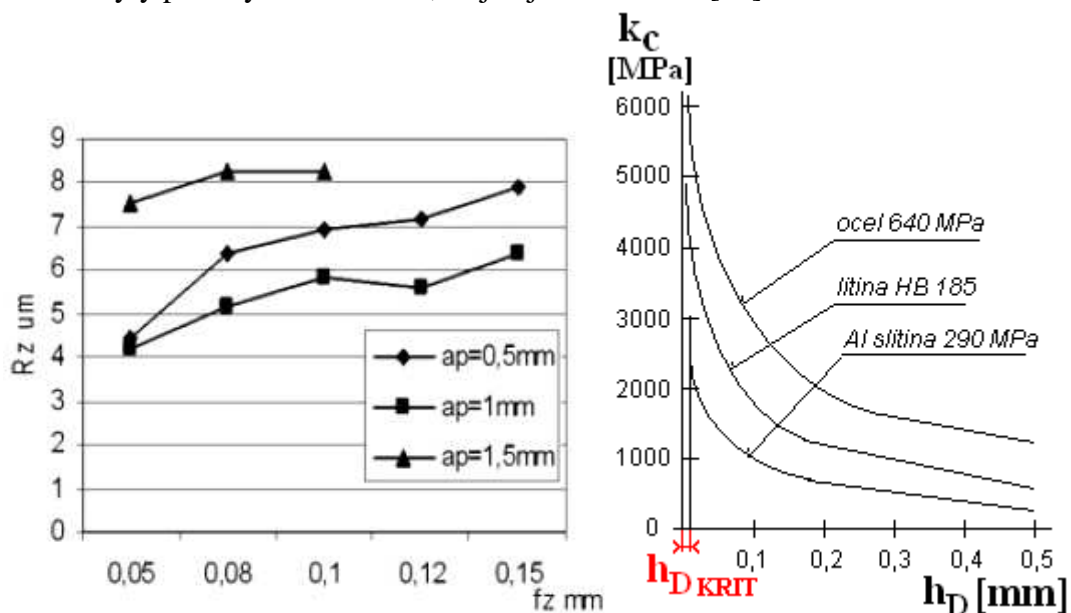
Další faktor ovlivňující výrazně trvanlivost břitu nástroje a tím i celý řezný proces je geometrie a zejména mikrogeometrie břitu nástroje. Pro obrábění korozivzdorných ocelí jsou nejvhodnější ostré nástroje s pozitivní geometrií. Pod pojmem mikrogeometrie se dnes ve většině případů sleduje poloměr zaoblení ostří r_N . Bylo potvrzeno, že tato hodnota by se pro dosažení co možná nejdelší trvanlivosti měla pohybovat v intervalu $r_N = 10 - 20 \mu\text{m}$. Vyšší hodnoty znamenají větší namáhání břitu z důvodu většího kontaktu nástroje a obráběného materiálu. Menší hodnoty znamenají vyšší zatížení z důvodu oslabení břitu.

Trvanlivost dále ovlivňují řezné podmínky. Zejména řezná rychlost a velikost posuvu. Při obrábění feriticko-martenzitických ocelí je pro většinu typů materiálů k dispozici oblast nízkých a vysokých řezných rychlostí. Mezi těmito oblastmi leží problematická zóna vzniku nárůstku na břitu, tzv. přechodová oblast. Její přesné umístění a šířka na intervalu řezných rychlostí závisí na celé řadě proměnných. V případě této práce se pravděpodobně tato oblast nachází kolem testované hodnoty $v_C = 226 \text{ m/min}$. Na *obr.10-2* je patrný vliv řezné rychlosti přímo na výslednou drsnost obrobeného povrchu, právě se zohledněním oblasti vzniku nárůstku.



Obr.10-2 Vliv řezné rychlosti na drsnost obrobeneho povrchu [84]

Vliv posuvu na trvanlivost a tím i na drsnost obrobeneho povrchu je teoreticky také jednoznačný. Čím vyšší je posuv, tím více se nástroj opotřebovává a tím horší je drsnost obrobeneho povrchu. To ovšem platí spíše v závislosti na čase obrábění. V oblasti dokončovacích frézování, v rámci této práce, byly zjištěny odlišné závěry. To bylo způsobeno tím, že porovnání bylo vztaženo ke konstantnímu úběru materiálu, a tím se závislost na čase obrábění poněkud deformovala, neboť za konstantní řezné rychlosti znamená vyšší posuv kratší čas obrábění a tím i kratší čas namáhání nástroje. Byly zde navíc použity tzv. „hladící“ VBD. Jejich úkolem je zajistit „dokonalý“ obrobene povrch za doporučených řezných podmínek. Na **obr.10-3** je závislost drsnosti obrobeneho povrchu na posuvu a hloubce řezu. Výsledky pouze předdokončovací fáze to potvrzují, neboť při předdokončování nebyly použity hladící VBD, stejně jako ve studii [52].



Obr.10-3 Vliv posuvu a hloubky řezu na drsnost obrobeneho povrchu (vlevo [52]) a vliv hloubky řezu na velikost řezného odporu (vpravo [85])

Vliv hloubky řezu a_p , resp. tloušťky odřezávané vrstvy h_D , na řezný proces nebyl v této práci sledován. Z teoretického hlediska se dá očekávat, že se zvětšující se hloubkou řezu se zhorší trvanlivost nástroje a také drsnost obrobeneho povrchu (viz **obr.10-3** vlevo). Z praktického hlediska se ale musí vzít v úvahu použitá hloubka řezu. Ta byla $a_p = 0,02$ mm. Se zmenšující se hloubkou

řezu a_p , resp. tloušťkou odřezávané vrstvy h_D , značně narůstá měrný řezný odpor k_C , viz *obr.10-3* vpravo, a s ním i silové zatížení břitu. Dá se tedy předpokládat, že se zvětšující se hloubkou řezu se bude trvanlivost nejprve zvyšovat. Změna drsnosti obrobeného povrchu by neměla být nijak citelná z důvodu konstrukce VBD.

V některých případech je vhodné také sledovat zpevnění povrchové vrstvy obrobku. To platí zejména u menších a dynamicky namáhaných součástí. V případě obrábění dělicí roviny parní turbíny nemá toto zpevnění na finální funkční vlastnosti povrchu žádný vliv. Vliv však může mít během samotného obrábění. Korozivzdorné oceli mají všeobecně sklon k deformačnímu zpevňování, a taková deformovaná povrchová vrstva má vliv na opotřebení nástroje. Obzvláště, je-li při dokončování hloubka řezu pouhých 0,02 mm. Ze sledovaných parametrů má na zpevnění povrchu největší vliv poloměr zaoblení ostří r_N . Čím větší je tato hodnota, tím větší je hloubka deformované vrstvy.

Bohužel nebyly nalezeny žádné informace ohledně vlivu technologických podmínek obrábění na parotěsnost. V případě použití hladících destiček a takových řezných podmínek, kdy bude dosažena maximální trvanlivost a minimální změny na obrobeném povrchu se však dá předpokládat, že obrábění nebude mít na tuto vlastnost negativní vliv. To ovšem platí pouze v případě dokonalé přesnosti stroje, která z tohoto hlediska hraje největší roli.

10.2 Přínos praxi a další řešení

Disertační práce vychází z velké části ze zadání projektu (viz *kap.6.1*). Zatímco výstupem této práce je především soubor experimentálních poznatků, výstupem projektu bylo doporučení podmínek pro nasazení v praxi. Proto je zde v závěru vhodné výsledky této práce provázat s praktickými výstupy a tím je potvrdit. Úkolem projektu bylo zproduktivnit obrábění při dodržení určitých požadavků. Těmi byla zejména trvanlivost a v dokončovací fázi také stav obrobeného povrchu.

V případě předdokončovacího obrábění došlo ke zproduktivnění „pouze“ doporučením nového řezného materiálu. Původně se na tuto operaci používal materiál IN2005 při $v_C = 180$ m/min a $f_Z = 0,15$ mm. V rámci experimentální činnosti se jako vhodnější materiál ukázal IN2004. S tímto materiálem bylo dosaženo vyšší trvanlivosti. Výsledky byly ověřeny v podniku ŠKODA POWER s.ro. dne 27.7.2010. Doporučené řezné podmínky pro IN2004 jsou $v_C = 140 - 180$ m/min a $f_Z = 0,15$ m/min. Za těchto podmínek je zaručena dvojnásobná trvanlivost.

V případě dokončovacího frézování došlo ke zproduktivnění volbou nového řezného materiálu a doporučením vyšších řezných podmínek při zaručení požadavků, kladených na tuto operaci. Původně se na tuto operaci používal IN0540 při $v_C = 180$ m/min a $f_Z = 4,5$ mm. V závislosti na experimentálním výzkumu byl doporučen IN2004 při $v_C = 270$ m/min a $f_Z = 6$ mm, který dosahoval lepších výsledků i za vyšších řezných podmínek. Úspěšné ověření na reálném tělese bylo realizováno 8.11.2011.

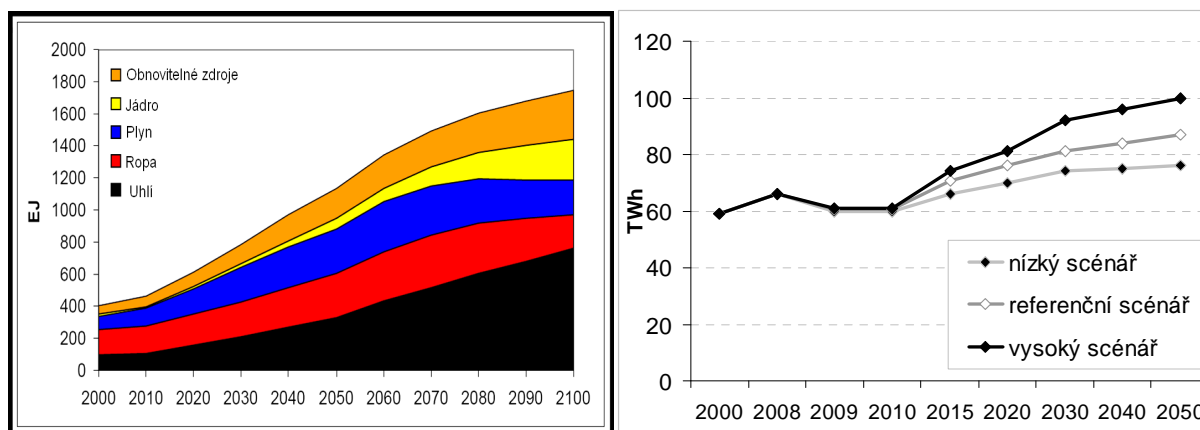


Obr.10-4 Ověřování doporučených podmínek na reálném tělese v podniku ŠKODA POWER s.r.o..

V průběhu řešení této práce vznikla řada předpokladů, které by bylo vhodné ověřit. Byl zjištěn určitý potenciál některých testovaných rezných materiálů. Zejména co se úpravy mikrogeometrie a použitého povlaku týče. Na tuto disertační práci proto navazuje další disertační práce, která se právě vlivem úpravy mikrogeometrie při obrábění oceli P91 zabývá.

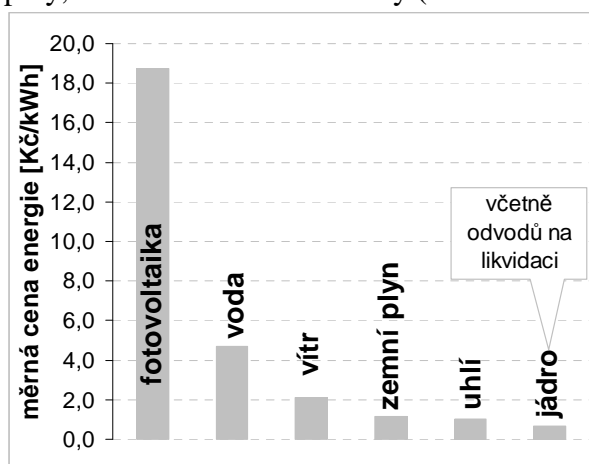
11 Závěr

Posláním energetiky každé země je zajistit spolehlivou, bezpečnou a k životnímu prostředí šetrnou dodávku energie pro potřeby obyvatelstva a ekonomiky při udržení konkurenceschopné a přijatelné ceny. Současně musí zabezpečit nepřerušovanou dodávku energie v krizových situacích. Zvyšující se životní standard s sebou přináší stále větší nároky na spotřebu elektrické energie. Celkový hospodářský růst České republiky je na růstu této spotřeby přímo závislý. Na *obr.11-1* je zobrazen předpokládaný vývoj spotřeby a její pokrytí z různých zdrojů včetně předpokladu hrubé spotřeby elektrické energie v České republice do r. 2050.



Obr.11-1 Předpokládaná spotřeba elektrické energie a její zdroje (vlevo) a předpoklad hrubé spotřeby elektrické energie v ČR do r. 2050 (vpravo) [88]

Není podstatné, na jakém principu jednotlivé zdroje pracují. Podstatné je, že 90% z nich produkuje elektrickou energii přeměnou tepelné energie na kinetickou. V takovém případě se většina těchto elektráren neobejde bez turbíny, jejímž pracovním médiem je pára. Současným trendem v této oblasti je maximalizovat energetickou účinnost těchto výrobních zařízení a zároveň snížit škodlivé emise poškozující životní prostředí. Proto je bezpodmínečně nutné zvýšit provozní teploty a tlaky právě pracovního média – páry, až na nadkritické hodnoty (více než 600°C a 25MPa).



Obr.11-2 Srovnání jednotlivých primárních zdrojů el.energie z hlediska měrné ceny energie [88]

Z hlediska splnění výše uvedených požadavků nemá konstruktér problém navrhnout turbínu takových parametrů, aby mohla pracovat za daných podmínek. Komplikace nenastávají ani v případě volby konstrukčního materiálu, kdy volba často padá na ocel P91, neboť ta splňuje požadavky kladené na konstrukční materiál pro práci za nadkritických podmínek. Problém ovšem nastává ve chvíli, kdy je nutné takový materiál obrobit a přitom dosáhnout poměrně přísných požadavků na kvalitu obrobeného povrchu, které jsou na tato zařízení kladeny.

O obrábění této oceli dnes nejsou k dispozici téměř žádné informace. Dokonce renomovaný výrobce parních turbín, jakým je společnost ŠKODA POWER s.r.o., má s obráběním tohoto materiálu určité problémy. To i přesto, že má tato společnost s obráběním korozivzdorných a těžkoobrobitelných materiálů mnohaleté bohaté zkušenosti.

Hlavním cílem této práce bylo popsání problematiky obrábění oceli P91 se zaměřením na předdokončovací a dokončovací frézování. Jedná se totiž o stěžejní fáze výrobního řetězce. Vznikl soubor podkladů, které popisují danou problematiku jak z hlediska nástroje, tak z hlediska obrobku. Byly sledovány vlivy činitelů, které ovlivňují jak průběh, tak výsledek řezného procesu. Značná pozornost byla věnována trvanlivosti nástroje a stavu obrobeného povrchu. Byla stanovena

celá řada závislostí. Navíc byly v průběhu hodnocení navrženy další metodiky hodnocení některých parametrů a práce s nimi. Tyto metodiky mohou rozšířit stávající postupy při hodnocení experimentálního studia na KTO. Vznikla také rozsáhlá databáze naměřených hodnot. Ta bude sloužit jako soubor podkladů pro výuku. Navíc bude stále rozšiřována, neboť obrábění feriticko-martenzitických ocelí spadá do dlouhodobého záměru katedry a aktivita v této oblasti bude pokračovat.

Tím, že tato práce vychází z projektu řešeného ve spolupráci s praxí, vznikla určitá omezení, která nebylo možné obejít. Z charakteru výroby byl jednoznačně stanoven typ nástroje a technologie. Byl také zadán dodavatel nástrojového vybavení. Tato omezení ale nebyla na závadu. Naopak se tím snížil počet proměnných, které by nakonec mohly výsledky spíše komplikovat. Konkurenceschopnost je dnes nezbytnou podmínkou, kterou musí splňovat každý dodavatel, který chce uspět ve svém oboru. Výrobce rezných nástrojů nevyjímaje. Ačkoliv byly testovány nástroje pouze od jediného výrobce je zřejmé, že obdobný sortiment nabízí celá řada dalších výrobců a zde stanovené závěry a doporučení mohou být platné i pro jiná řešení.

Feriticko-martenzitická ocel P91 se stává stále oblíbenějším konstrukčním materiálem. Navíc se již vyvíjejí další modifikace této oceli, jako např. stupeň P92. Dá se předpokládat, že vývoj bude stále pokračovat tímto směrem. S ocelí P91 se také počítá jako s konstrukčním materiálem pro jaderné reaktory IV. generace [89]. V této oblasti energetiky jsou požadavky na výrobu ještě náročnější [88]. Tato práce je tedy příspěvkem rozšiřujícím znalostní databázi týkající se problematiky frézování tohoto konstrukčního materiálu.

12 Literatura

- [1] TRENT, E.M., WRIGHT, P.K.: *Metal Cutting*, fourth edition; Butterworth-Heinemann Woburn MA (USA); ISBN 978-0-7506-7069-2; 2000
- [2] SAHA, P.K.: *Comparing materials for high-temperature steam piping - The use of X20 and P91 in power stations*; on-line dostupný z: www.thefabricator.com
- [3] ZRNÍK, J.: učební texty k předmětu *MATERIÁLY ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ KMM/MEZ*; Plzeň 2010
- [4] ARIVAZHAGAN, B., SUNDARESAN, KAMARAJ, M.: *A study on influence of shielding gas composition on toughness of arc weld of modified 9Cr–1Mo (P91) steel*; Journal of Materials Processing Technology; Elsevier; 2009
- [5] THOMAS, P.V., SAROJA,S., VIJAYALAKSHMI, M.: *Microstructural stability of modified 9Cr–1Mo steel during long term exposures at elevated temperatures*; Journal of Nuclear Materials; Elsevier; 2008
- [6] SHIBLI, A., STARR, F.: *Some aspects of plant and research experience in the use of new high strength martensitic steel P91*; International Journal of Pressure Vessels and Piping 84 (2007); Elsevier, 2007
- [7] MAEKAWA, K., OHHATA, H., KITAGAWA, T.: *Simulation analysis of machinability of leaded CrMo and MnB structural steels*; Journal of Materials Processing Technology, Volume 62, Issue 4; Elsevier, 1999
- [8] JANDOVÁ, D., KASL, J., KANTA, V.: *Žáropevnost a mikrostruktura svarových spojů oceli P91*. In sborník konference Metal 2006, Hradec nad Moravicí, 2006
- [9] HENNHOFFER, K., JAKOBOVÁ, A.: *Vlastnosti svarového spoje modifikované 9% Cr oceli P 91 s nízkolegovanou CrMoV ocelí 15 128*. In sborník konference Metal 2001, Ostrava, 2001
- [10] MARTÍNEK, P.: *Mikrostruktura a žárovevné vlastnosti svarového spoje oceli P92*. In sborník soutěže SVOČ 2009. ZČU Plzeň, 2009
- [11] MÍKOVÁ, R.: *Korozně - mechanické chování oceli P91*. In sborník konference Metal 2004, Hradec nad Moravicí, 2004
- [12] SCHWARZ, D., KOUKAL, J., SONDEL, M.: *Žárupevné vlastnosti modelovaných pásem TOO a reálných svarových spojů oceli P91*. In Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování. Český svářečský ústav s.r.o., Ostrava, 2003, vol. 6, pp. 7-24. ISBN 80-28- 443-3.
- [13] KAWASAKI, H., OHTSUBO, T.: *Martensitic stainless steel for seamless steel pipe*; United States patent, nr.5939018; 1999
- [14] KVACKAJ, T., KUSKULIC, T., a kol.: *Development of microstructure of steel for thermal power generation*; Materials and technology 41 (2007); ISSN 1580-2949; 2007
- [15] PURMENSKÝ, J., FOLDYNA, V., MATOCHA, K.: *Advanced creep-resisting steels, their properties and practical use*; In sborník konference Metal 2006, Hradec nad Moravicí, 2006
- [16] KOUTSKÝ, J.: *Materiály tepelně-energetických zařízení*. ZČU Plzeň, 1991
- [17] SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění*. Scientia, 1997
- [18] *Stainless Steel – Fabrication*; online dostupný z: <http://www.azom.com>, 2002
- [19] *Material Selection - Types of stainless steel*; online dostupný z: [www.fanagalo.co.za /tech/tech_selection.htm](http://www.fanagalo.co.za/tech/tech_selection.htm); 2009
- [20] *Stainless Steel for Machining, Designer Handbook*; online dostupný z <http://www.ssina.com>
- [21] RAMESH, A., SHREYES, N.M.: *Modeling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel*; International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008); Elsevier 2008
- [22] GREZESIK, W.: *Advanced machining processes of metallic materials*; first edition 2008; Elsevier, Oxford (UK); ISBN 978-0-08-044534-2; 2008
- [23] BUMBÁLEK, B.: *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*; ÚST-FSI, VUT Brno

- [24] KOCMAN, K. BUMBÁLEK, B., a kol.: *Typologie povrchu ploch dokončených vysocepřesnými metodami obrábění*. VZ ÚST-FSI, VUT Brno, 2002
- [25] DOSTÁL, F.: *Drsnost obrobených ploch*; SNTL Praha; 1962
- [26] MÁDL, J., a kol.: *Technologie obrábění*; skriptum; ČVUT Praha, 2002
- [27] BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠTÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha : SNTL, 1989. 340 s. ISBN 80-85825-10-4
- [28] JAWAID, A., OLAJIRE, K.A., EZUGWU, E.O.: *Machining of martensitic stainless steel with coated carbides*; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of engineering manufacture; ISSN 0954-4054; 2001
- [29] LIEW, W.Y.H., NGOI, B.K.A., LU, Y.G.: *Wear characteristics of PCBN tools in the ultra-precision machining of stainless steel at low speeds*; Wear 254 (2003); Elsevier, 2003
- [30] CHEVRIER, P., a kol.: *Investigation of surface integrity in high speed end milling of a low alloyed steel*; International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003); Elsevier, 2003
- [31] FALLBOÖHMER, P., a kol.: *High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing*; Journal of Materials Processing Technology 98 (2000), Elsevier, 2000
- [32] SHAO, H., LIU, L., QU, L.: *Machinability study on 3%Co–12%Cr stainless steel in milling*; Wear 263 (2007); Elsevier, 2007
- [33] FRANCO, P., ESTREMS, M., FAURA, M.: *Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools*; International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004); Elsevier, 2004
- [34] FRANCO, P., ESTREMS, M., FAURA, M.: *A study of back cutting surface finish from tool errors and machine tool deviations during face milling*; International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008); Elsevier, 2008
- [35] BAEK, D.K., TAE, K., KIM, H.S.: *Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model*; International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001); Elsevier, 2000
- [36] BAEK, D.K., TAE, K., KIM, HS.: *A dynamic surface roughness model for face milling*; Precision Engineering 20 (1997); Elsevier, 1997
- [37] NURUL AMIN, A.K.M., a kol.: *Influence of preheating on performance of circular karbide inserts in end milling of carbon steel*; Journal of Materials Processing Technology 185 (2007); Elsevier, 2007
- [38] DENKENA, B., PLÖGER, J., BREIDENSTEIN, B.: *Influence of high speed cutting on the formation of residual stresses*; In sborník Production engineering: research and development; volume IX; Braunschweig (D); ISBN 3-9807670-5-1; 2004
- [39] MÁDL, J., SUTANO, H.: *Residual stress in machining of hardened steel*; In sborník IV. International congress on precision machining; volume I, Kielce (Pl); ISBN 978-83-88906-91-6; 2007
- [40] MIKO, E., NOWAKOWSKI, L.: *Influence of the machining parameters on the geometry of surfaces formed by face-milling with a milling head*; In sborník IV. International congress on precision machining; volume II, Kielce (Pl); ISBN 978-83-88906-91-6; 2007
- [41] CALDEIRANI, F., DINIZ, A.E.: *Influence of Cutting Conditions on Tool Life, tool Wear and Surface Finish in the Face Milling Process*; Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science, ISSN 0100-7386; 2002
- [42] RYU, S.H., KI CHO, D., NAM CHU: *Roughness and texture generation on end milled surfaces*; In International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006); Elsevier, 2006
- [43] SILLER H. R. a kol.: *Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools*; International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2009); Springer-Verlag London Limited, 2009

- [44] KORKUT, I., DONERTAS, M.A.: *The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool–chip contact length during face milling*; In *Materials and Design* 28 (2007); Elsevier Ltd., 2007
- [45] NURUL AMIN, A.K.M., a kol.: *Effects of workpiece preheating on surface roughness, chatter and tool performance during end milling of hardened steel D2*; In *Journal of materials processing technology*; Elsevier 2008
- [46] ASLAN, E.: *Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC)*; *Materials and Design* 26 (2005); Elsevier 2005
- [47] BAEK, D., KOT, J., KIM, H.S.: *A dynamic surface roughness model for face milling*; *Precision Engineering*; Elsevier 1997
- [48] RAHMAN, M., KUMAR, A.S., SALAM, M.U.: *Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling*; In *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002); Elsevier, 2002
- [49] AXINTE, D.A., DEWES, R.C.: *Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling – experimental data and empirical model*; In *Journal of Materials Processing Technology* 127; Elsevier 2002
- [50] BRUNI, C., a kol.: *Surface roughness modelling in finish face milling under MQL and dry cutting conditions*; In *International Journal of Material Forming*, Lyon (France), 2008
- [51] AVILA, R.F., ABRAO, A.M.: *The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel*; In *Journal of Materials Processing Technology* 119 (2001); Elsevier, 2001
- [52] ČIRČOVÁ, E., IŽOL, P.: *Obrobený povrch po rezaní jednoho a via klinovým nástrojom*; In *Transfer inovací*; dostupný z www.sjf.tuke.sk; 2008
- [53] EZUGWU, E.O., OLAJIRE, K.A.: *Evaluation of machining performance of martensitic stainless steel*; In *Tribology Letters*, Vol. 12, No. 3, April 2002; Plenum Publishing Corporation 2002
- [54] *9-10%Cr Feriticko-martenzitické oceli používané pro odlitky komponentů parních turbín*; Materiálová specifikace; Škoda Energo; 2003
- [55] SROGONČÍK, A.: *Řezivost frézovacího nástroje s aplikací vybraných druhů tenkých vrstev při obrábění kalené oceli*; Diplomová práce; ZČU v Plzni, 2008
- [56] HOCHMAN, A.: *Progresivní frézování feriticko-martenzitické oceli P91*; Diplomová práce; ZČU v Plzni; 2010
- [57] PERSSON, U., CHANDRASEKARAN, A.: *Machinability of martensitic steels in milling and the role of hardness*; 6th International tooling conference; Sweden
- [58] DOUBRAVA, K.: *Principy odvrtačací metody*; *Bulletin of Applied Mechanics* 5; ČVUT Praha, 2006
- [59] GANEV, N., KRAUS, I.: *O spolehlivosti a věrohodnosti difrakční analýzy napětí*; *Materials Structure*, vol. 6, number 1; Krystalografická společnost; 2000
- [60] KŘÍŽ, A.: *Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování*; podklady k přednášce, dostupné z www.ateam.zcu.cz; Plzeň
- [61] MARQUES, M.J., a kol.: *Surface integrity of D2 and D2-8%Cr tool steel milled using cemented carbide and CBN cutting tools*; 2nd International Conference ;Innovative Cutting Processes & Smart Machining; 2008
- [62] DINIZ, A.E., a kol.: *Toroidal milling of hardened SAE H13 steel*; *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science*; 2004
- [63] TOTTEN, G., HOWES, M., INOUE, T.: *Handbook of residual stress and deformation of steel*; ASM International; 2002; ISBN 0-87170-729-2
- [64] LIAO, Y.S., LIN, H.M.: *Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel*; *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007); Elsevier 2007

- [65] JANDA, Z.: *Řezné síly při HSC obrábění řeznou keramikou*; Diplomová práce; ZČU v Plzni; 2007
- [66] ASTAKOV, V.P.: *Geometry of turning tools and drills: Fundamentals and practical applications*; Springer-Verlag London Limited; 2010
- [67] RECH, J.: *Cutting edge preparation and surface issues*; HSS Forum's International Conference; Aachen, February 2005
- [68] KRŮŽ, A.: *Vliv mikrostruktury slinutých karbidů na životnost nástrojů a strojních součástí*; presentace Fraktografie 2006; online dostupný z: ateam.zcu.cz
- [69] HUMÁR, A.: *Materiály pro řezné nástroje*; MM Publishing, s. r. o., Praha 2008, ISBN 978-80-254-2250-2
- [70] DAVIM, J.P.: *Surface integrity in Machining*; Portugal: Springer London, 2009. ISBN 978-1-84882-873-5.
- [71] KOUBEK, J., SMOLÍK, J., VRHEL, J.: Seminář „Energeticky efektivní výrobní stroje“ na METAVu 2010; Svět strojírenské techniky; 6/2010
- [72] HUMÁR, A.: *TECHNOLOGIE I.*; Studijní opory pro magisterskou formu studia; VUT Brno, 2003
- [73] SANDVIK COROMANT. *Technická příručka obrábění*. AB Sandvik Coromant, 2005
- [74] PRAMET: *Příručka obrábění*; 2004
- [75] CSELLE, T., a kol.: *PVD technologie přípravy otěruvzdorných a kluzných vrstev v průmyslových podmínkách*; Jemná mechanika a optika; ročník 51; 4/2006
- [76] *New Colors II*; katalog společnosti Ingersoll
- [77] ŘEHOŘ, J.: *Teoretické a experimentální studium problematiky HSC obrábění ocelí vysoké pevnosti a tvrdosti*. Disertační práce. ZČU Plzeň, 2003
- [78] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie 1.část*; podklady k předmětu, VŠB-TU Ostrava, 2004
- [79] ZETEK, M.: *Zvyšování řezivosti nástrojů pomocí PVD technologií*; disertační práce, ZČU Plzeň, 2010
- [80] HUMÁR A.: *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Vydalo CCB s. r. o., Brno 1995, ISBN 80-85825-10-4
- [81] JÍLEK, M., a kol.: *Nová průmyslová technologie povlakování*; MM průmyslové spektrum; 2003
- [82] HUDEČEK, P.: *Testování řezivosti nástrojů ze slinutých karbidů povlakovaných nanokrystalickými kompozity*; diplomová práce, VUT Brno, 2009
- [83] HNÁTÍK, J.: *Vliv stroje a nástroje na přesnost digitalizace*; disertační práce, ZČU Plzeň, 2009
- [83] FILIPČÍK, J.: *Optimalizace výroby dílu pro letecký průmysl*; diplomová práce; VUT Brno, 2009
- [84] ARIAS, R.A.: *Analysis of surface roughness for end milling operations*, online dostupný z: <http://etd.lib.ttu.edu>, 1993
- [85] HOFMANN, P.: *Teorie obrábění*; podklady k předmětu KTO/TO; ZČU Plzeň
- [86] BORO VAN, P.: *Obráběcí stroje a nářadí v roce 2011*; Technický týdeník 10/2011, online dostupný z: www.techtydenik.cz; 2011
- [87] *Zkouška penetrační*; online dostupný z: www.testinglab.cz/defekt03.php
- [88] FALOUT, J., JANDA, Z.: *Problematika výroby komponent v jaderném průmyslu*; Strojírenská technologie – časopis pro vědu, výzkum a výrobu (přijato k tisku); 2012
- [89] CORWIN, W.R.: *Generation IV reactor integrated materials technology program*; Nuclear Engineering and technology vol.38, no.7; 2009
- [90] MÁDL, J., a kol.: *Jakost obráběných povrchů*; FVTM, UJEP, 2003. ISBN 80-7044-539-4.

PŘÍLOHY

k disertační práci

Studie problematiky frézování feriticko-martenzitické oceli P91

Obsah

P-1	Experimentální vybavení.....	3
P-1.1	Obráběcí stroj MCV 750 A	3
P-1.2	Drsnoměr MarSurf M300	3
P-1.3	Drsnoměr DIAVITE DH-5	3
P-1.4	Mikroskopická kamera Digitus USB.....	3
P-1.5	Tvrdoměr WHU – 330.....	4
P-1.6	Mikroskop MULTICHECK PC 500	4
P-1.7	Soustava pro měření a zpracování silového zatížení.....	4
P-1.7.1	Dynamometr KISTLER.....	5
P-1.7.2	Zesilovač.....	5
P-1.7.3	Sběrná karta	5
P-1.7.4	Software pro záznam a zpracování dat	5
P-2	Nástrojové vybavení.....	6
P-2.1	Předdokončování	6
P-2.1.1	Nástroj	6
P-2.1.2	Řezné materiály	6
P-2.1.3	Poloměr zaoblení ostří r_N	8
P-2.2	Dokončování.....	10
P-2.2.1	Nástroj	10
P-2.2.2	Řezné materiály	11
P-2.2.3	Poloměr zaoblení ostří r_N	12
P-2.2.4	Chemické složení.....	16
P-3	Zpracování naměřených dat	17
P-3.1	Vyhodnocení řezných sil - matematicko-statistická analýza.....	17
P-3.1.1	Vyrovnaní závislostí a statistická analýza.....	17
P-3.1	Zpracování naměřených dat drsnosti obrobeného povrchu.....	18
P-3.2	Stanovení reprezentativního profilu obrobeného povrchu	19
P-3.3	Porovnání obrobených povrchů z hlediska materiálového podílu	22
P-3.4	Metoda hodnocení dokončovací fáze experimentu	24
P-4	Předdokončování	25
P-4.1	Trvanlivost řezného nástroje - preexperiment	25
P-4.2	Drsnost obrobeného povrchu - preexperiment	28
P-4.3	Kapilární defektoskopická zkouška na mikrotrhliny - preexperiment	30
P-4.4	Změna tvrdosti obrobeného povrchu - preexperiment	32
P-4.5	Trvanlivost řezného nástroje – experiment	33
P-4.6	Drsnost obrobeného povrchu - experiment	35
P-4.7	Vliv řezných podmínek na celkové silové zatížení – experiment	36
P-5	Dokončování.....	37
P-5.1	Trvanlivost řezného nástroje - preexperiment	37
P-5.2	Drsnost obrobeného povrchu - preexperiment	38
P-5.3	Efektivní řezný výkon - preexperiment	40
P-5.4	IN2004 - experiment.....	42
P-5.5	IN2010- experiment.....	45
P-5.6	IN0540 - experiment.....	49
P-5.7	Celkové porovnání - experiment	53

P-1 Experimentální vybavení

P-1.1 Obráběcí stroj MCV 750 A

Veškeré experimentální obrábění bylo realizováno na tříosřadnicovém vertikálním obráběcím centru MCV 750 A od společnosti MAS Sezimovo Ústí.

Technické parametry

počet CNC řízených os:	3
jmenovitý výkon vřetena:	16 kW
rozsah otáček vřetena [min^{-1}] :	20 – 13000
změna otáček:	plynulá
zdvih v ose X, Y, Z [mm]:	750, 500, 500
rozměry upínacího stolu [mm]:	1000 x 500
pracovní posuvy X, Y, Z [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]:	1-15000
rychloposuvy X, Y, Z [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]:	25
řídící systém:	Heidenhein TNC 426

P-1.2 Drsnoměr MarSurf M300

Technické parametry

Měřicí rozsah:	do 350 μm
Citlivost:	0,001 μm
Normy:	ISO, ASME, JIS a MOTIF (volitelně)
Vyhodnocované veličiny:	DIN/ISO: Ra, Rq, Rz, Rmax, Rp, Rpk, Rk, Rvk, Rv, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rt, R3z, R _{Pc} , R _{mr} , R _{Sm} JIS: Ra, Rz, RzJIS, Sm, S, tp ASME: Rp, Rpm MOTIF: R, Ar, Rx, W, CR, CL, Rz, Rmax, R3z, Rt ... 0 - 200 μm
Délka měřicí dráhy dle DIN EN ISO 4288 [mm]:	1,75; 5,6; 17,5
Délka měřicí dráhy dle DIN EN ISO 12085 [mm]:	1; 2; 4; 8; 12; 16
Počet měřitelných drah:	1 - 5 (volitelně)

K vyhodnocení získaných náměrů byl použit software MarSurf PS1/M300 Explorer.

P-1.3 Drsnoměr DIAVITE DH-5

Měřené veličiny:	- Ra, Rz, Rmax, R3z, Rt, Rq
Měřicí rozsahy:	- Ra, Rq ... 0 - 20 μm - Rz, Rmax, R3z, Rt ... 0 - 200 μm
Citlivost:	- Ra, Rq ... 0,01 μm - Rz, Rmax, R3z, Rt ... 0,1 μm
Délka pojezdu l_t [mm]:	0,5; 1,5; 4,8; 15
Délka oříznutí l_c [mm]:	0,08; 0,25; 0,8; 2,5

P-1.4 Mikroskopická kamera Digitus USB

Pro sledování topografie povrchu byla použita mikroskopická kamera Digitus USB. Tato univerzální digitální mikroskopická kamera znázorňuje objekt v „živém pohledu“ se zvětšením 10 až 200x. Zabudované bílé LED světlo spolehlivě zaručuje ostrý obraz.

Technické parametry

plynulé zvětšení: 10x - 200x
rozlišení snímků: 640 x 480 pixel

P-1.5 Tvrdoměr WHU – 330

Pro sledování případných změn tvrdosti obrobeného povrchu byl použit přenosný dílenský tvrdoměr WHU – 330. Jedná se o digitální přenosný tvrdoměr pro dynamické a rychlé měření tvrdosti dle ASTM A 956, s výměnnými sondami: DC / D+ / 15 / G / C / E. Tvrdoměr je možné použít pro všechny kovové materiály a měření lze realizovat ve všech směrech.

Technické parametry

přímé zobrazení stupnic tvrdosti: Rockwell [HRB, HRC], Vickers [HV], Brinell [HB]
Shore [HS, HL]

přesnost: $\pm 0,5\%$ (při HLD = 800)

výstup: RS-232

paměť: na 1250 měřených skupin

napájení: 2x 1,5V AAA

provozní teplota: 5 až 50°C

rozměry: 135 x 55 x 25 mm, hmotnost 250 g

měřený vzorek:

maximální hodnota tvrdosti 940HV

poloměr (konvexní / konkávní) $R_{\min} = 50$ mm (s nastavcem $R_{\min} = 10$ mm)

minimální hmotnost 2 kg na pevné podložce (0,1 kg s kontaktní pastou)

minimální tloušťka ve spojení s podložkou 3 mm, při použití sondy G až 10 mm

minimální tloušťka kalené vrstvy 0,8 mm

P-1.6 Mikroskop MULTICHECK PC 500

Ke sledování opotřebení a v některých případech také pro sledování vzniklých třísek byl používán dílenský mikroskop MULTICHECK PC 500. Tento mikroskop je využitelný jak pro měření rotačních, tak i pro měření nerotačních nástrojů.

Technické parametry

rotační i nerotační nástroje

horizontální provedení

rozsah osy x a y [mm]: 0 - 150 mm

možnost natáčení nástroje vůči objektivu 0° - 90°

4 objektivy se zvětšením: 10x, 30x, 75x a 150x

další příslušenství: přípravek pro upínání rotačních nástrojů;

přípravek pro měření rotačních i nerotačních nástrojů

prizmatický přípravek pro měření VBD

P-1.7 Soustava pro měření a zpracování silového zatížení

Na následujícím obrázku **PI-1** je zobrazena zjednodušená soustava potřebná pro měření velikosti řezných sil. Skládá se z dynamometru, zesilovače, sběrné karty a počítače se softwarem potřebným k zaznamenání dat.



P1-1 Soustava pro měření řezných sil

P-1.7.1 Dynamometr KISTLER

Pro měření byl použit tříoskový dynamometr pro frézování firmy KISTLER 9255A, který snímá tři vzájemně kolmé síly.

Technické parametry

měřicí rozsah ve směru X [kN]:	-20 až 20
měřicí rozsah ve směru Y [kN]:	-20 až 20
měřicí rozsah ve směru Z [kN]:	-10 až 40
dovolená provozní teploty [°C]:	0 až 70
vlastní frekvence [kHz]:	3
chyba měření [%]:	1
citlivost [pC/N]:	8
spojovací kabel se zesilovačem:	1687A5

P-1.7.2 Zesilovač

Pro měření byl použit zesilovač KISTLER 5007, který mění elektrický náboj z dynamometru na elektrické napětí úměrné velikosti náboje. Dané napětí je pak dle potřeby zesilováno.

Technické parametry

Měřicí rozsah:	10 až 500 000 pC (max. přeměněn na 10 V při 100 Ω)
Citlivost:	0,1 až 11000 pC/N
Přesnost pro nejcitlivější rozsah:	3%
Přesnost pro ostatní rozsahy:	1%

P-1.7.3 Sběrná karta

Pro měření byla použita pomocná karta typu PCLD 85511 fy ADVANTECH, pomocí které se připojují vstupní/výstupní veličiny k vlastní sběrné kartě. Tato pomocná karta je umístěna mimo počítač a kabelem propojena s vlastní sběrnou kartou, která je zapojena v příslušném slotu uvnitř PC. Typ použité sběrné karty - PCL 85511 fy ADVANTECH. Nejdůležitějším technickým údajem o sběrné kartě je její vzorkovací frekvence, ta je větší než 25 kHz.

P-1.7.4 Software pro záznam a zpracování dat

Pro záznam dat byl použit specializovaný software Labview 6.1, jenž registruje velikost řezných sil v závislosti na čase [$F=f(t)$]. Vstupní informací je signál přicházející ze sběrné karty. Program vytváří uživatelské prostředí, ve kterém je dialog uživatele s počítačem veden formou hierarchického menu a speciálními grafickými prostředky. Postup při práci s daným programem prochází čtyřmi fázemi: konfigurací experimentu, monitorováním, vlastním měřením a uložením

dat, a zpracováním naměřených dat (numerické nebo grafické, možnost filtrace). Naměřená data jsou zpracována v podprogramu MAXIS, který byl vyvinut na ZČU/FST v Plzni.

P-2 Nástrojové vybavení

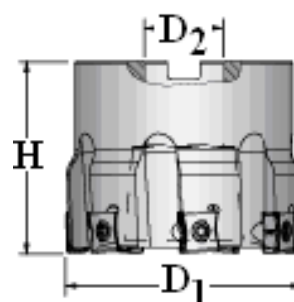
P-2.1 Předdokončování

P-2.1.1 Nástroj

Jako testovací nástroj byla použita frézovací hlava 6K6V080R00 od společnosti Ingersoll o průměru 80 mm, která má totožnou geometrii jako nástroje používané pro danou operaci v reálném procesu. Nástroj je osazen 8 tangenciálními VBD. Frézovací hlava je uzpůsobena pro vnitřní chlazení.

Parametry frézovací hlavy Ingersoll $\varnothing 80$ mm:






$D_1 = 80$ mm
 $D_2 = 27$ mm
 $H = 50$ mm
 $z = 8$
 $m = 1,21$ kg



Obr.P2-1 Parametry frézovací hlavy Ingersoll $\varnothing 80$ mm

P-2.1.2 Řezné materiály [76]

Typ		Charakteristika
IN 2004		Vysoce výkonný širokorozsahový karbid s PVD povlakem s vysokou odolností proti opotřebení a velkou houževnatostí. Pro frézování legovaných ocelí a litin při středních až vysokých řezných rychlostech. Pro dokončování a lehké hrubování zejména při stabilních podmínkách
IN 2005		Povlakovaný jemnozrný SK s dobrou houževnatostí a výbornou odolností proti opotřebení při obrábění ocelí se zvýšenou houževnatostí, jako jsou korozivzdorné oceli, šedé litiny a tvárné litiny.

<p>IN2015</p>		<p>VBD s povlakem TiAlN, která kombinuje vynikající odolnost proti opotřebení s dobrou houževnatostí pro obrábění šedé a tvárné litiny a oceli s vyšší houževnatostí, stejně tak austenitické oceli. Bývají uplatňovány pro střední řezné rychlosti a zatížení zubů.</p>
<p>IN 2030</p>		<p>VBD s povlakem TiAlN, která kombinuje dobrou odolnost proti opotřebení s vysokou houževnatostí pro obrábění nerezové a austenitické oceli, vysokoteplotní slitiny, šedé litiny pro střední a vyšší řezné rychlosti.</p>
<p>IN 2040</p>		<p>VBD s povlakem TiAlN s vynikající odolností proti opotřebení a pro obrábění širokého spektra ocelí. Obzvláště vhodná pro frézování nelegované a kalené oceli za sucha se středními a vysokými řeznými rychlostmi.</p>
<p>IN 6510</p>		<p>VBD s MT-CVD povlakem s vynikající odolností proti opotřebení a houževnatostí pro frézování šedé a tvárné litiny s malými a středními průřezy třísek a středními a vysokými řeznými rychlostmi.</p>
<p>IN 6515</p>		<p>VBD s MT-CVD povlakem kombinující vynikající odolnost proti opotřebení s vysokou houževnatostí pro obrábění se střední a vysokou řeznou rychlostí se středním průřezem třísky. Vhodná také pro obrábění šedé a tvárné litiny za nepříznivých řezných podmínek.</p>

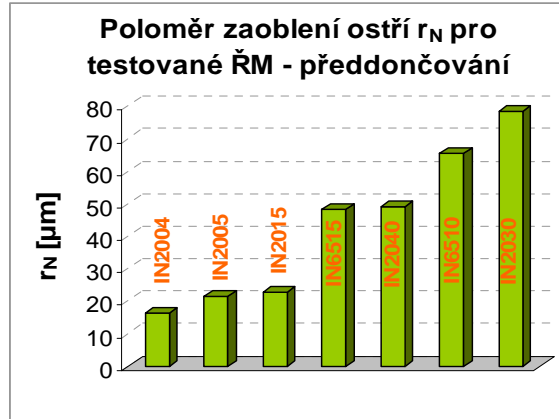
Tab.P2-1 Použité VBD - předdokončování

P-2.1.3 Poloměr zaoblení ostří r_N

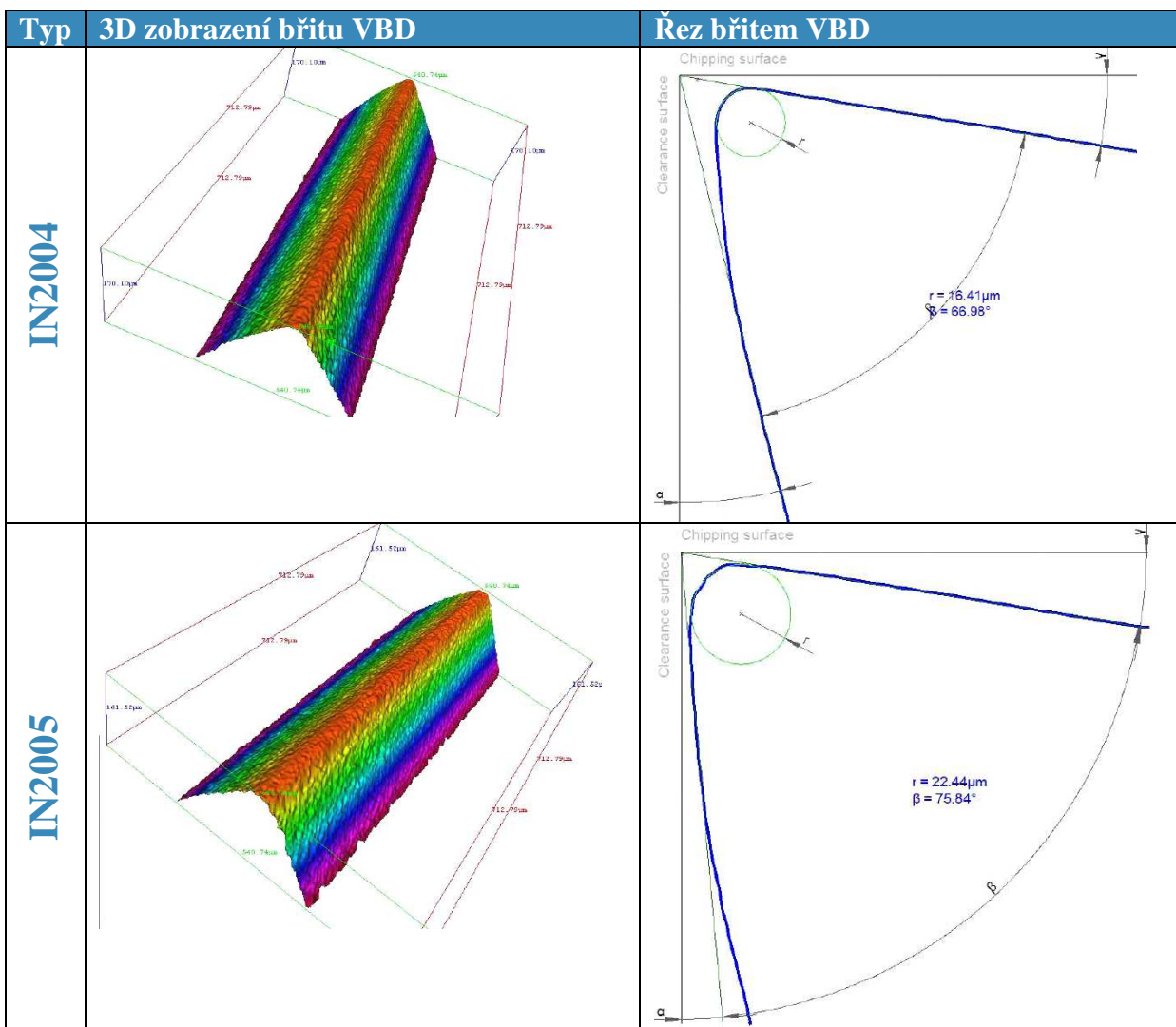
Ve spolupráci se společností Hofmeister s.r.o. bylo realizováno měření poloměru zaoblení ostří r_N všech testovaných předdokončovacích VBD. V tabulce **P2-2** jsou uvedeny průměrné hodnoty tohoto parametru pro jednotlivé testované typy řezných materiálů. V tabulce **P2-3** jsou pro jednotlivé typy ŘM uvedeny 3D zobrazení břitu a řezy břitem.

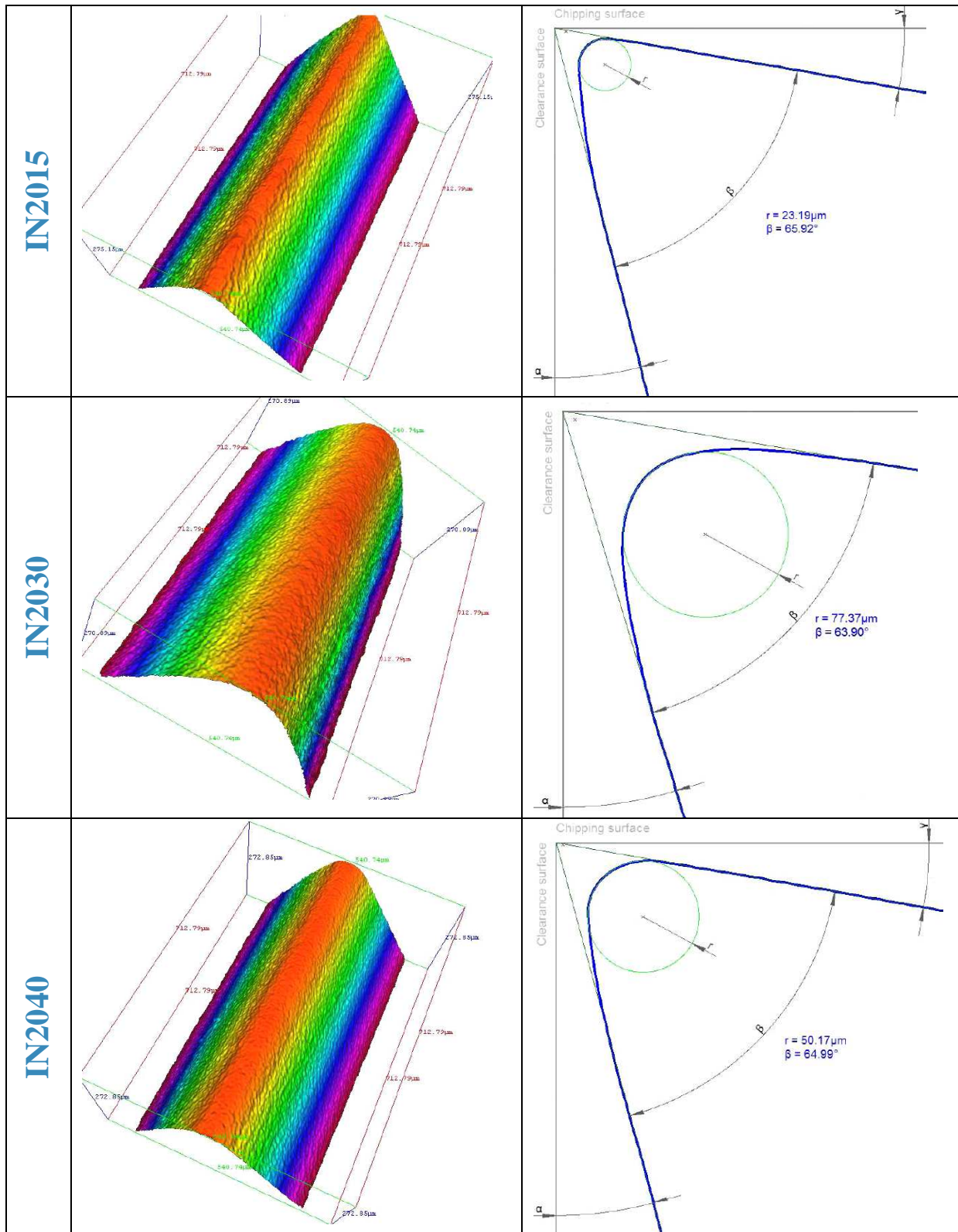
VBD (typ ŘM)	r_N [μm]
IN2004	16,4
IN2005	21,5
IN2015	22,5
IN6515	48,3
IN2040	49
IN6510	65,3
IN2030	78,4

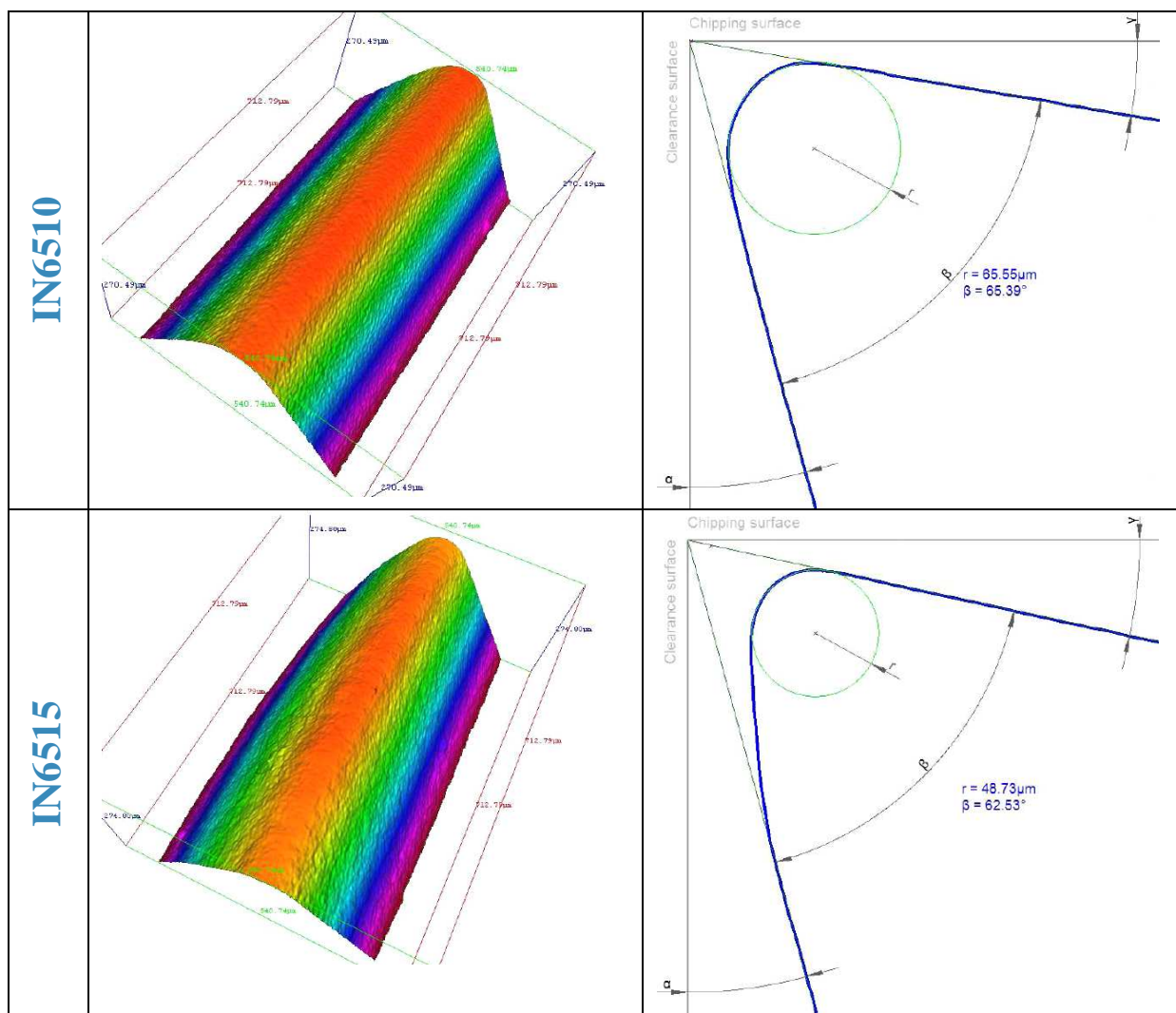
Tab.P2-2 Hodnoty r_N - předdokončování



Obr..P2-2 Grafické porovnání velikostí poloměru zaoblení ostří r_N pro předdokončovací VBD









Tab.P2-3 3D zobrazení břitu a řezy břitem


P-2.2 Dokončování

P-2.2.1 Nástroj

Jako testovací nástroj byla použita frézovací hlava od společnosti Ingersoll s označením 6F2B080R00 o průměru $d = 80$ mm, která má totožnou geometrii jako nástroje používané pro danou operaci v reálném procesu. Jedná se o nástroj pro čtyři tangenciální VBD. Frézovací hlava není uzpůsobena pro vnitřní chlazení.

P-2.2.2 Řezné materiály [76]

Typ			Charakteristika
IN2004		P10 - P20, K10 - K25	Vysoce výkonný širokorozsahový karbid s PVD povlakem s vysokou odolností proti opotřebení a velkou houževnatostí. Pro frézování legovaných ocelí a litin při středních až vysokých řezných rychlostech. Pro dokončování a lehké hrubování zejména při stabilních podmínkách
IN2005		M15 - M35, K20 - K40	Povlakovaný jemnozrný SK s dobrou houževnatostí a výbornou odolností proti opotřebení při obrábění ocelí se zvýšenou houževnatostí, jako jsou korozivzdorné oceli, šedé litiny a tvárné litiny.
IN2010		K10 - K25	Karbid povlakovaný vrstvou TiAlN s dobrou odolností proti opotřebení při obrábění šedé litiny a to za středních až vyšších řezných rychlostí. Tento stupeň je vhodný zejména tehdy, když je použita pozitivní řezná geometrie za nepříznivých řezných podmínek.
IN2040		P20 - P40	VBD s povlakem TiAlN s vynikající odolností proti opotřebení a pro obrábění širokého spektra ocelí. Obzvláště vhodná pro frézování nelegované a kalené oceli za sucha se středními a vysokými řeznými rychlostmi.
IN10K		K10 - K25	Tato VBD je nepovlakovaná verze IN2010. Je charakterizována vyšší odolností proti opotřebení. Pro hrubování a dokončování litin, hliníkových slitin, nezelezných kovů stejně jako plastů. Použití především pro nižší zatížení zubů, ale při vyšších rychlostech obrábění.
IN60C		P10 - P30	Cermetová VBD s vysokou odolností proti opotřebení při vysokých řezných rychlostech obrábění. Také je odolná proti vytváření nárůstku. Používá se převážně pro předdokončovací obrábění. Vhodné pro plynulé dokončovací obrábění, tedy nepřerušovaný řez. Výrobce doporučované řezné rychlosti jsou 200 a 250 m/min.

IN0560		P05 - P15, M05 - M15	Povlakovaný cermet určený pro dokončovací frézování ocelí za vysokých řezných rychlostí. Doporučuje se pro obrábění korozivzdorných a austenitických ocelí. Vhodné pro plynulé dokončovací obrábění, tedy nepřerušovaný řez. Výrobce doporučované řezné rychlosti jsou 200 a 250 m/min.
IN0540		P20 - P40	

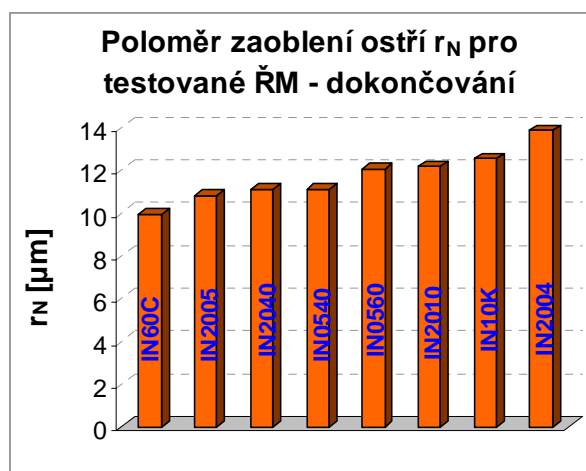
Tab.P2-4 Použité VBD – dokončování

P-2.2.3 Poloměr zaoblení ostří r_N

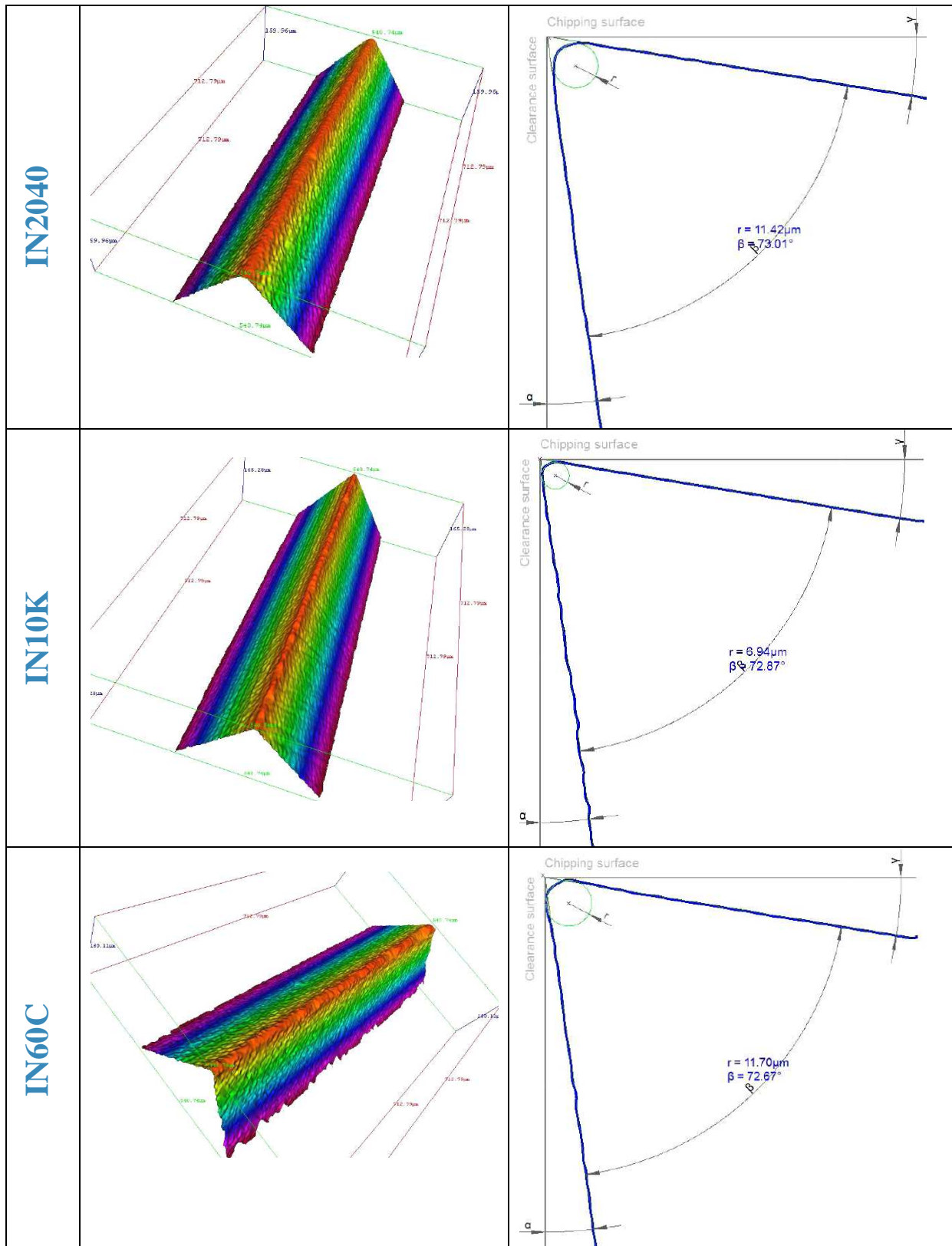
Ve spolupráci se společností Hofmeister s.r.o. bylo realizováno měření poloměru zaoblení ostří r_N všech testovaných dokončovacích VBD. V tabulce **P2-5** jsou uvedeny průměrné hodnoty tohoto parametru pro jednotlivé testované typy řezných materiálů. V **tab.P2-6** jsou pro jednotlivé typy ŘM uvedeny 3D zobrazení břitu a řezy břitem.

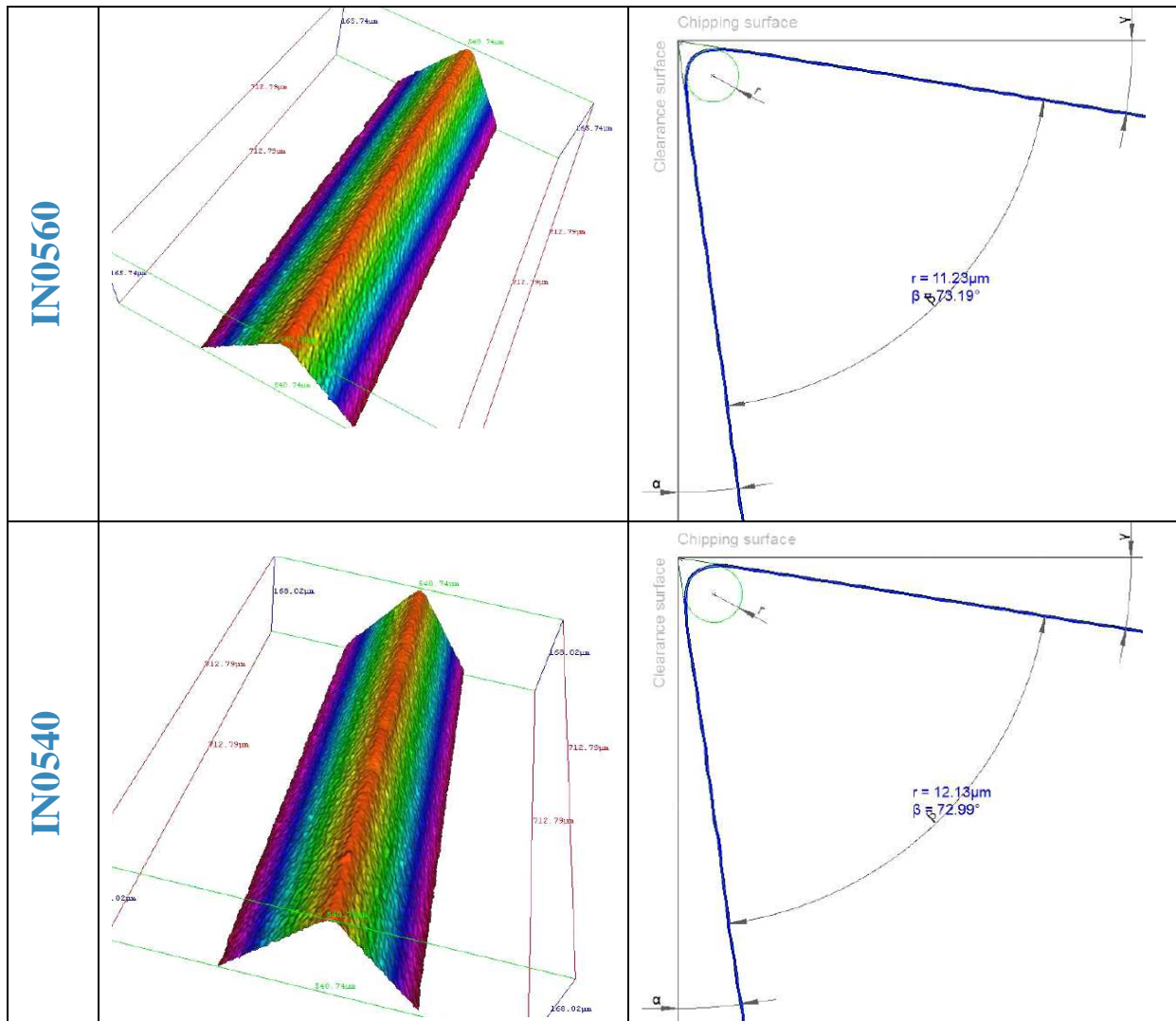
VBD (typ ŘM)	r_N [μm]
IN2004	13,8
IN2005	10,8
IN2010	12,2
IN2040	11,1
IN10K	9,7
IN60C	9,9
IN0560	12
IN0540	11

Tab.P2-5 Hodnoty r_N – dokončování



Obr.P2-3 Grafické porovnání velikostí poloměru zaoblení ostří r_N ; dokončovací VBD





Tab.P2-6 3D zobrazení břitu a řezy břitem

P-2.2.4 Chemické složení

Typ	Substrát		povlak	
	prvek	[%]	prvek	[%]
IN2004	W	85,6	Al	35,7
	Co	5,8	Ti	21,65
	C	8,6	N	40,25
IN2005	W	81,2	Al	37,8
	Co	9,6	Ti	23,75
	C	9,3	N	38,5
IN2010	W	83	Ti	38,85
	Co	5,9	Al	24,75
	C	11,1	N	36,3
IN2040	W	81,5	Ti	40,5
	Co	8	Al	25,15
	C	10,5	N	34,35
IN0540	W	77,5	Ti	66
	Co	8	N	33
	C	14,5		
IN10K	W	84,1	Bez povlaku	
	Co	4		
	C	11,8		
IN60C	W	9,3	Bez povlaku	
	Ta	7,15		
	Ni	5,7		
	Co	7,8		
	V	2,6		
	Ti	30,2		
	Mo	10,1		
	N	11,04		
C	16,1			
IN0560	W	10,1	Ti	71,5
	Ta	7,4	N	28,5
	Ni	5		
	Co	6,9		
	V	2,5		
	Ti	29,3		
	Mo	9,6		
	N	12,2		
	C	16,9		

Tab.P2-6 Chemické složení VBD a jejich povlaků

P-3 Zpracování naměřených dat

P-3.1 Vyhodnocení řezných sil - matematicko-statistická analýza [77]

P-3.1.1 Vyrovnání závislostí a statistická analýza

Vyrovnání závislostí

Nejčastěji používaný a také nejpřesnější způsob tzv. vyrovnání závislostí je regresní analýza metodou nejmenších čtverců. Regresní analýza řeší otázku, jak na základě experimentálně získaných hodnot co možná nejlépe popsat vztah mezi nezávisle a závisle proměnnou matematickou funkcí. K řešení se používá metody nejmenších čtverců, která pracuje na principu: proložení funkce naměřenými hodnotami tak, aby součet druhých mocnin odchylek naměřených hodnot od hodnot funkčních (součet ploch vzniklých čtverců nebo součet rozptylů) byl minimální.

Navržená funkce se musí převést do lineárního tvaru (v tomto případě se provede linearizace logaritmováním a vhodná substituce) tak, aby tzv. „odhadová“ funkce měla následující tvar:

$$\hat{y} = a_0 \cdot x_0 + a_1 \cdot x_1 + \dots + a_n \cdot x_n \quad (r-1)$$

a = konstanta

x = nezávisle proměnná

\hat{y} = regresní odhad závisle proměnné

Součtová funkce rozptylů má pak tvar :

$$S = \sum_{i=1}^n \left(y_i - \hat{y} \right)^2 \quad (r-2)$$

S = součtová funkce rozptylů

y = naměřená hodnota závisle proměnné

Minimum této funkce lze nalézt z parciálních derivací a z jejich rovnosti k nule (hledá se extrém):

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial a_n} = 0, \quad (r-3)$$

Tím tedy vznikne soustava n rovnic o n neznámých a jejím řešením je možno získat číselné hodnoty konstant ($a_0 \dots a_n$), které se zpětně dosadí do lineárního tvaru navržené funkce. Po odlogaritmování je k dispozici navržená „odhadová“ funkce již s číselnými hodnotami konstant a exponentů.

Výše uvedené rovnice lze řešit pomocí matic a determinantů tzv. „manuálním“ způsobem, který je ovšem zdlouhavý, méně přesný a pro tak velké množství zpracovávaných dat, jako v tomto případě, nemyslitelný. Z tohoto důvodu bylo využito počítačový způsob výpočtu. Výpočet byl realizován v programu MS EXCEL (funkce „LINREGRESE“). Postup výpočtu je téměř shodný s výše uvedeným modelem, jen s tím rozdílem, že kromě zadání vstupních dat (hodnoty řezných sil) veškeré výpočty provádí sám zmíněný program. Výstupní informací je matice dat, která obsahuje nejen číselné hodnoty regresních koeficientů, ale také data potřebná pro statistickou analýzu.

Statistická analýza [77]

Po stanovení koeficientů regresní funkce se provádí statistické zhodnocení výsledků měření a odhadové regresní funkce. Pro statistické zhodnocení se využívá řada statistických testů, z nichž ty nejdůležitější jsou: test významnosti regresních koeficientů (Studentovo t -kritérium) a test statistické významnosti regresní funkce (Fischer-Snedecorovo F -kritérium).

A) TEST VÝZNAMNOSTI REGRESNÍCH KOEFICIENTŮ

Významnost se hodnotí velikostí tzv. Studentova t -kritéria určeného dle následujícího vzorce, v porovnání s jeho tabulkovou hodnotou:

$$t_j = \frac{|a_j|}{S_{a_j}} \quad (r-4)$$

a_j = koeficient regresní funkce (a_0, \dots, a_n)

S_{a_j} = směrodatná odchylka koeficientu a_j

Koeficient a_j bude statisticky významný, když vypočtené t_j se stupněm volnosti $f = n-1$ bude větší než ve statistické tabulce vyhledané $t_{0,05}$ (pro pravděpodobnostní hladinu 95%). V případě, že koeficient a_j se ukáže statisticky málo významný, pak je účelné ho vyloučit.

B) TEST STATISTICKÉ VÝZNAMNOSTI REGRESNÍCH FUNKCE

Statistická významnost regresní funkce se hodnotí velikostí Fischer-Snedecorova

F -kritéria stanoveného z naměřených hodnot vzhledem k jeho tabulkové hodnotě [9].

VELIKOST KRITÉRIA F PRO OPAKOVANÉ MĚŘENÍ

Vzniká reprodukční rozptyl. Velikost se určí ze vztahu:

$$F = \frac{s_R^2}{s_r^2} \quad (r-5)$$

s_R^2 = regresní rozptyl se stupněm volnosti $f_1 = 1$

s_r^2 = residuální rozptyl se stupněm volnosti $f_2 = n-2$

VELIKOST KRITÉRIA F PRO NEOPAKOVANÉ MĚŘENÍ

Velikost se určí ze vztahu:

$$F = \frac{s_y^2}{s_r^2} \quad (r-6)$$

s_y^2 = rozptyl oproti střední hodnotě \hat{y} se stupněm volnosti $f_1 = n-1$

Významnosti regresní funkce bude tím větší, čím větší je vypočtené F s příslušným stupněm volnosti oproti tabulkovému $F_{0,05}$ (tzn. pro pravděpodobnosti 95 %.)

P-3.1 Zpracování naměřených dat drsnosti obrobeného povrchu [78]

Měření je soubor experimentálních úkonů, jejichž cílem je určení hodnoty určité veličiny, tj. určení kvantitativní charakteristiky určitého kvalitativního znaku (vlastnosti) určitého objektu. Je-li měření opakováno za stejných podmínek zjistíme, že výsledky měření se od sebe více nebo méně liší. Toto je způsobeno nepřesnostmi měřicího systému, nedodržením konstantních podmínek měření atd. Každé měření je zatíženo chybou.

Také při hodnocení drsnosti obrobeného povrchu v rámci této práce se v souboru naměřených hodnot vyskytovaly hodnoty, které se výrazně lišily od většiny ostatních. Tyto odchylky mohly být způsobeny jak chybou měření, tak také samotným řezným procesem. To znamená, že se mohly na obrobeném povrchu vyskytovat místa, kde bylo dosaženo odlišné hodnoty drsnosti obrobeného povrchu. Aby bylo možné naměřené hodnoty dále zpracovávat, bylo s těmito odchylkami zacházeno jako s hrubými chybami.

Měřicí zařízení bylo nastaveno tak, že bylo zaznamenáváno celkem devět parametrů drsnosti obrobeného povrchu. Pro zpracování byly ale sledovány pouze čtyři parametry: Ra, Rmax, Rt a Rz. Příčinou hrubých chyb je nesprávně provedené měření, nesprávný odečet údaje, nesprávný způsob zpracování, vada přístroje, nesprávná manipulace s měřidlem apod. Výsledek měření ovlivněný hrubou chybou je nepoužitelný. Naměřené hodnoty zatížené hrubou chybou se ze souboru naměřených hodnot vylučují a nesmí se v měření pokračovat, pokud nebudou příčiny odstraněny. V některých případech je možno toto provést až po otestování podezřelých naměřených hodnot a to z důvodu možnosti, že naše rozhodnutí o vyloučení (nevyloučení) podezřelých hodnot ze souboru by mohlo být nesprávné.

Testování podezřelých hodnot (hodnot zatížených hrubou chybou) je možno uskutečnit za předpokladu normálního rozdělení hustoty pravděpodobnosti.

Postup při testování odlehle hodnoty při neznámé směrodatné odchylce střední hodnotě je následující:

- a) ze souboru naměřených hodnot $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ se vypočte střední hodnota,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (r-7)$$

a výběrová směrodatná odchylka

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (r-8)$$

- b) pro posouzení odlehlosti podezřelých hodnot souboru (x_2, x_n) se vypočtou normované hodnoty H_2, H_n ($x_2 < \bar{x}, x_n < \bar{x}$):

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \text{ popř. } H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)} \quad (r-9)$$

- c) z tabulek se určí mezní hodnota H pro předem stanovenou pravděpodobnost p a počet měření v souboru n (**tab. P3-1**).

Rozsah výběru n	5	10	15	20	30	40	50	100
Mezní hodnoty H	1,67	2,18	2,41	2,56	3,402	3,48	3,541	3,723

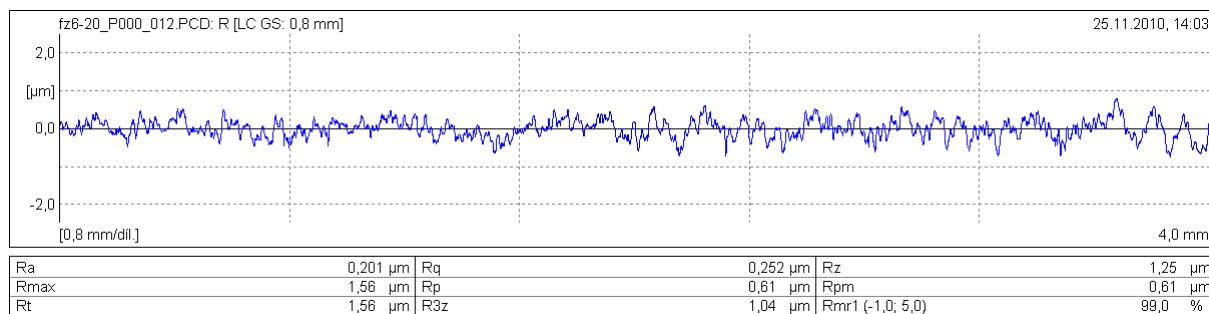
Tab.P3-1 Mezní hodnoty H pro pravděpodobnost $p = 95\%$

- d) za předpokladu, že $H_2 < H$ a $H_n < H$ hodnota x_2 není zatížena hrubou chybou a ponechá se v souboru, ale hodnota x_n je ovlivněna hrubou chybou a ze souboru naměřených hodnot se vyloučí.

P-3.2 Stanovení reprezentativního profilu obrobeného povrchu

Z důvodu možnosti porovnání jednotlivých získaných profilů obrobeného povrchu v závislosti na proměnných řezných podmínkách a použitém řezném materiálu bylo nutné nejprve stanovit reprezentativní profil obrobeného povrchu. Pro každý řezný materiál bylo při jedné kombinaci řezných podmínek po dosažení určité hodnoty objemu odebraného materiálu získáno, včetně opakování, celkem 36 náměrů. Celkem to znamená přes 2400 náměrů v rámci experimentu a více než 600 náměrů v rámci pre-experimentu. Nejprve byly ze souboru náměrů vyřazeny náměry

nevhodné (viz předchozí kapitola). Poté byla stanovena průměrná aritmetická hodnota sledovaných parametrů drsnosti (R_a , R_{max} , R_t a R_z). Tyto hodnoty byly vynášeny do grafů. Pro práci se získanými profily bylo nutno najít takové profily, které nejlépe vyhovují těmto naměřeným hodnotám. Takové profily mohou posloužit jako reprezentativní pro jednotlivé obrobené povrchy. Vzorový postup stanovení takového reprezentativního profilu je zobrazen v následující tabulce. Takto stanovený profil pro dané řezné podmínky je zobrazen na **obr.P3-1**.



Obr.P3-1 Charakteristický profil obrobeného povrchu včetně výsledků; $v_c = 270$ m/min; $f_z = 6$ mm; IN2004

i	Ra [µm]	ΔRa	YRa [%]	Rmax [µm]	ΔRmax	YRmax [%]	Rt [µm]	ΔRt	YRt [%]	Rz [µm]	ΔRz	YRz [%]	ΣΔi [µm]	ΣYi [µm]	ȳi [%]	profil
1	0,287	0,089	31,010	1,760	0,247	14,034	1,760	0,148	8,409	1,350	0,098	7,259	0,582	60,713	15,178	...
2	0,188	0,010	5,319	1,410	0,103	7,305	1,410	0,202	14,326	1,220	0,032	2,623	0,347	29,573	7,393	...
3	0,209	0,011	5,263	1,560	0,047	3,013	1,960	0,348	17,755	1,450	0,198	13,655	0,604	39,686	9,922	...
4	0,187	0,011	5,882	1,420	0,093	6,549	1,420	0,192	13,521	1,190	0,062	5,210	0,358	31,163	7,791	...
5	0,195	0,003	1,538	1,410	0,103	7,305	1,480	0,132	8,919	1,170	0,082	7,009	0,320	24,771	6,193	...
6	0,193	0,005	2,591	1,450	0,063	4,345	1,490	0,122	8,188	1,210	0,042	3,471	0,232	18,594	4,649	...
7	0,185	0,013	7,027	1,750	0,237	13,543	1,780	0,168	9,438	1,490	0,238	15,973	0,656	45,981	11,495	...
8	0,178	0,020	11,236	1,340	0,173	12,910	1,340	0,272	20,299	1,160	0,092	7,931	0,557	52,376	13,094	...
9	0,218	0,020	9,174	1,670	0,157	9,401	1,830	0,218	11,913	1,450	0,198	13,655	0,593	44,143	11,036	...
10	0,201	0,003	1,493	1,560	0,047	3,013	1,560	0,052	3,333	1,250	0,002	0,160	0,104	7,999	2,000	1
11	0,204	0,006	2,941	1,450	0,063	4,345	1,530	0,082	5,359	1,230	0,022	1,789	0,173	14,434	3,609	5
12	0,173	0,025	14,451	1,390	0,123	8,849	1,540	0,072	4,675	1,150	0,102	8,870	0,322	36,845	9,211	...
13	0,190	0,008	4,211	1,460	0,053	3,630	1,610	0,002	0,124	1,210	0,042	3,471	0,105	11,436	2,859	2
14	0,197	0,001	0,508	1,580	0,067	4,241	1,610	0,002	0,124	1,360	0,108	7,941	0,178	12,814	3,203	4
15	0,192	0,006	3,125	1,530	0,017	1,111	1,730	0,118	6,821	1,340	0,088	6,567	0,229	17,624	4,406	...
16	0,206	0,008	3,883	1,610	0,097	6,025	1,610	0,002	0,124	1,220	0,032	2,623	0,139	12,656	3,164	3
17	0,194	0,004	2,062	1,290	0,223	17,287	1,360	0,252	18,529	1,140	0,112	9,825	0,591	47,703	11,926	...
18	0,198	0,000	0,000	1,480	0,033	2,230	1,480	0,132	8,919	1,130	0,122	10,796	0,287	21,945	5,486	...
19	0,214	0,016	7,477	1,450	0,063	4,345	1,470	0,142	9,660	1,270	0,018	1,417	0,239	22,899	5,725	...
20	0,178	0,020	11,236	1,310	0,203	15,496	1,310	0,302	23,053	1,070	0,182	17,009	0,707	66,795	16,699	...
21	0,197	0,001	0,508	1,630	0,117	7,178	2,180	0,568	26,055	1,370	0,118	8,613	0,804	42,354	10,588	...
22	0,198	0,000	0,000	1,620	0,107	6,605	1,730	0,118	6,821	1,360	0,108	7,941	0,333	21,367	5,342	...
23	0,179	0,019	10,615	1,370	0,143	10,438	1,440	0,172	11,944	1,120	0,132	11,786	0,466	44,783	11,196	...
24	0,198	0,000	0,000	1,660	0,147	8,855	1,770	0,158	8,927	1,320	0,068	5,152	0,373	22,933	5,733	...
25	0,207	0,009	4,348	1,910	0,397	20,785	1,970	0,358	18,173	1,330	0,078	5,865	0,842	49,170	12,293	...
26	0,184	0,014	7,609	1,480	0,033	2,230	1,780	0,168	9,438	1,220	0,032	2,623	0,247	21,900	5,475	...
27	0,193	0,005	2,591	1,650	0,137	8,303	1,750	0,138	7,886	1,240	0,012	0,968	0,292	19,747	4,937	...
28	0,183	0,015	8,197	1,420	0,093	6,549	1,530	0,082	5,359	1,130	0,122	10,796	0,312	30,902	7,725	...
29	0,203	0,005	2,463	1,260	0,253	20,079	1,310	0,302	23,053	1,150	0,102	8,870	0,662	54,465	13,616	...
\bar{R}_a	0,198	$\bar{R}_a \max$		1,513	\bar{R}_t		1,612	\bar{R}_z		1,252	IN2004, $v_c = 270$ m/min, $f_z = 6$ mm					
σ_{Ra}	0,02	$\sigma_{R_a \max}$		0,15	σ_{R_t}		0,21	σ_{R_z}		0,11						

Tab.P3-2 Postup stanovení reprezentativního profilu

Postup stanovení reprezentativního profilu (viz tab.P3-2):

1. pro jednotlivé parametry R_i (Ra, Rmax, Rt a Rz) byly stanoveny průměrné hodnoty:

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^i R_i \quad (r-10)$$

a směrodatné odchytky:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \quad (r-11)$$

2. pro jednotlivé náměry i byly stanoveny odchytky všech hodnocených parametrů R_i od jejich průměrných hodnot v absolutní hodnotě:

$$\Delta_{R_i} = |\bar{x} - R_i| [\mu m] \quad (r-12)$$

a procentuelně:

$$y_R = \left(\frac{\Delta_{R_i}}{R_i} \right) \cdot 100 [\%] \quad (r-13)$$

3. pro jednotlivé náměry i byl stanoven celkový součet odchylek všech sledovaných parametrů R_i v absolutní hodnotě:

$$\Sigma \Delta_i = \Delta_{Ra_i} + \Delta_{Rmax_i} + \Delta_{Rt_i} + \Delta_{Rz_i} [\mu m] \quad (r-14)$$

a v procentech:

$$\Sigma y_i = y_{Ra_i} + y_{Rmax_i} + y_{Rt_i} + y_{Rz_i} [\%] \quad (r-15)$$

Navíc byla stanovena také průměrná hodnota odchytky parametrů R pro jednotlivé náměry i :

$$\bar{y}_i = \frac{\Sigma y_i}{4} [\%] \quad (r-16)$$

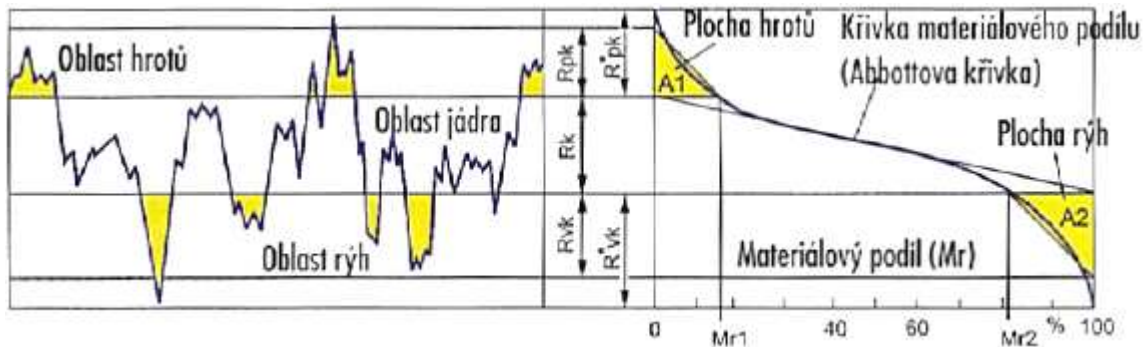
4. jako charakteristický profil obrobeného povrchu byl stanoven ten, který dosáhl nejnižších hodnot $\Sigma \Delta_i$, Σy_i a \bar{y}_i .

P-3.3 Porovnání obrobených povrchů z hlediska materiálového podílu

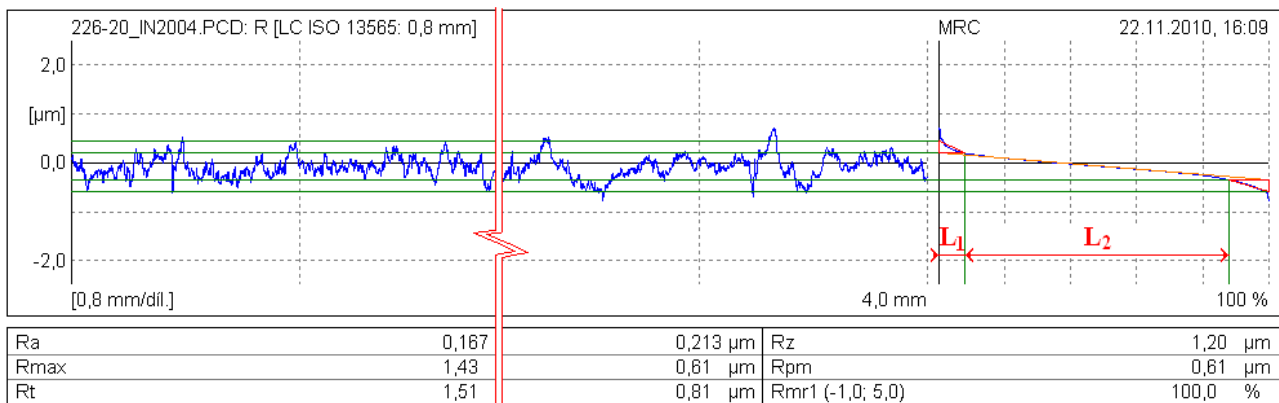
Konstrukce grafů

Z důvodu vhodnějšího popsání stavu obrobeného povrchu bylo nutné porovnat jednotlivé povrchy lépe než jen pomocí parametrů drsnosti obrobeného povrchu (Ra, Rz, atd.). Jedním z požadavků, kladených na dělicí rovinu tělesa parní turbíny je její parotěsnost. V průběhu řešení této práce nebyla nalezena žádná publikace či informační zdroj zabývající se vlivem drsnosti obrobeného povrchu na parotěsnost a její hodnocení. Byl tedy využit parametr obrobeného povrchu, který byl

speciálně vytvořen pro hodnocení nosných vlastností povrchů. Jedná se o křivku materiálového poměru profilu MRC (nosná křivka) viz **obr.P3-2**. Hodnoty charakterizující tuto křivku nebyly naměřeny, proto je není možné vyčíslit. Jednotlivé křivky se však dají graficky porovnat.



Obr.P3-2 Vyjádření materiálového podílu profilu v závislosti na drsnosti obrobeneho povrchu

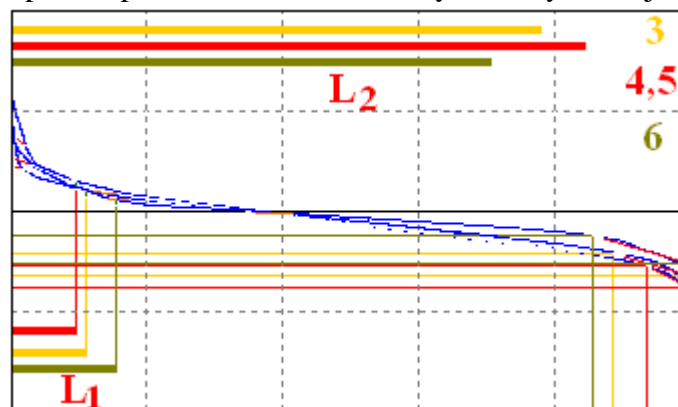


Obr.P3-3 Profil obrobeneho povrchu s vykreslenou křivkou materiálového poměru profilu

Na **obr.P3-3** je zobrazen profil obrobeneho povrchu s vykreslenou křivkou materiálového poměru. Pro každý reprezentativní povrch byla vykreslena tato křivka. Křivky poté byly vzájemně porovnány. Takové porovnání je znázorněno na **obr.P3-4**. Jelikož není možné provést číselné porovnání, je provedeno porovnání grafické. Z hlediska sledované parotěsnosti jsou důležité dva parametry (porovnat **obr.P3-3 a P3-4**):

L₁ – kritická část profilu: jedná se o extrémní výstupky. Tato hodnota by měla být co možná nejmenší;

L₂ – nosný podíl profilu povrchu. Tato hodnota by měla být co největší.

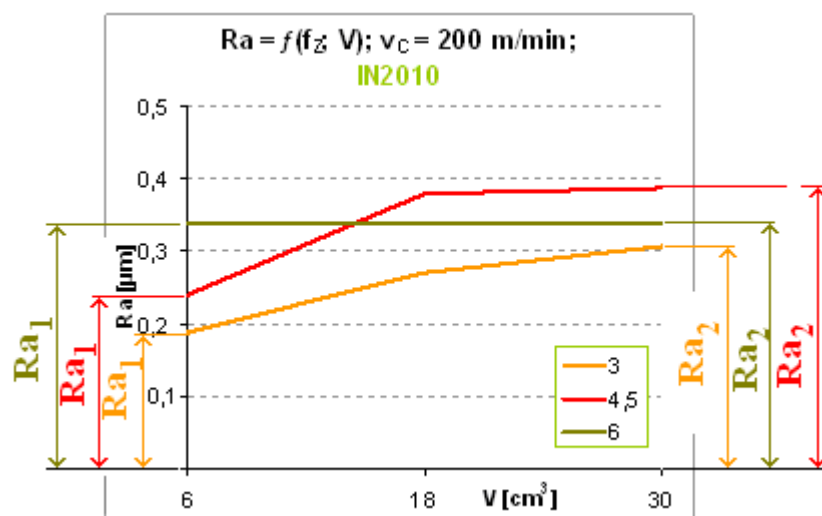


Obr.P3-4 Ukázka porovnání nosného podílu profilu v závislosti na f_z ; barevně odlišeny řezné podmínky

P-3.4 Metoda hodnocení dokončovací fáze experimentu

V případě dokončovacího obrábění nebylo možné provést vyhodnocení způsobem, jakým bylo provedeno v případě předdokončovacího frézování. To z důvodu, že každý ŘM byl testován za odlišných řezných podmínek a naměřená data byla vyhodnocována zvlášť. Navíc výsledky se často pohybovaly v úzkých intervalech a tak by výsledné bodování nemuselo mít takovou vypovídací hodnotu. Byla proto použita následující metoda hodnocení. Toto porovnání bylo vždy provedeno pro všechny typy VBD za všech testovaných řezných podmínek. Takto hodnocena byla drsnost obrobeneho povrchu R_a , opotřebení na hřbetě VB_N , nosný podíl profilu a jeho kritická část a potřebný výkon stroje.

Jak je z příkladu na **obr.P3-5** patrné, ve všech případech je možné výslednou drsnost akceptovat, neboť ani jeden z průběhů nedosáhl maximální přípustné hodnoty. Nicméně je jasné, že některé řezné podmínky jsou lepší, neboť je vhodnější konstantní hodnota na celé ploše než sice nižší, avšak proměnlivá.



Obr.P3-5 Postup při hodnocení dosažených výsledků

Pro každý průběh byla stanoveny dvě číselné hodnoty, X a Y kdy $X = R_{a1} + R_{a2}$ a $Y = R_{a2} - R_{a1}$. Hodnota X zohledňuje dosaženou hodnotu sledované veličiny a hodnota Y zohledňuje průběh této veličiny v závislosti na zvyšujícím se objemu odebraného materiálu. Tyto hodnoty byly určeny pro všechny ŘM při všech řezných podmínkách. Bylo provedeno zvlášť vzájemné porovnání hodnot X a zvlášť hodnot Y. Je jasné, že čím menší byly jednotlivé hodnoty X a Y, tím lepší byl dosažený výsledek. Poté byly jednotlivé varianty podmínek ohodnoceny body od 1 do 10. Čím lepší výsledky, tím více bodů. Pro názornost je přiložena tabulka hodnocení drsnosti R_a . Hodnoty z **obr.P3-5** a jejich výsledné pořadí jsou barevně zvýrazněny. Nakonec byly body za X a za Y sečteny a zadány do hodnotící tabulky 9-7 viz **kap.9.3**. Následovalo sečtení bodů získaných za jednotlivé sledované parametry (R_a , T, atd.). Nejlépe dopadly ty ŘM a řezné podmínky, které dosáhli největšího počtu bodů.

v_c	f_z	X	body		v_c	f_z	Y	body
270	3,0	0,37	10	IN2004	200	6,0	0	10
180	4,5	0,45	9		150	4,5	0,02	9
150	4,5	0,46	8		226	4,5	0,02	9
150	4,5	0,47	7		300	4,5	0,02	9
270	6,0	0,48	6		150	4,5	0,03	8
226	4,5	0,49	5		270	3,0	0,04	7
200	3,0	0,49	5	IN2010	180	4,5	0,05	6
226	4,5	0,5	4		226	4,5	0,05	6
270	4,5	0,57	3		270	6,0	0,08	5
300	4,5	0,60	2		200	3,0	0,12	4
200	4,5	0,63	1		150	6,0	0,12	4
200	6,0	0,67	0		200	4,5	0,15	3
150	6,0	0,77	0	IN0540	270	4,5	0,30	2
180	4,5	0,92	0		150	4,5	0,41	1
150	4,5	0,93	0		150	3,0	0,41	0
150	3,0	0,95	0		180	4,5	0,43	0
200	4,5	0,97	0		200	4,5	0,43	0

Tab.P3-3 Příklad hodnocení dosažených výsledků pro drsnost obrobeného povrchu Ra

Tento postup je vhodný z kvalitativního hlediska hodnocení dosažených výsledků. Důležitá je však také kvantitativní stránka věci. Proto bylo nutné zahrnout do hodnocení produktivitu obrábění, avšak s respektováním dosažených výsledků. Toto hodnocení bylo vztaženo k nejproduktivnějším řezným podmínkám, a to k $v_c = 270$ m/min a $f_z = 6$ mm pro IN2004. Za těchto podmínek trvá obrobení jedné plochy $t = 4,7$ min. Pro jednotlivé kombinace řezných podmínek byl stanoven koeficient produktivity q . Tento koeficient se rovná podílu nejmenšího možného času obrábění z celého souboru (4,7 min) a času potřebnému pro jednotlivé kombinace řezných podmínek. Tento koeficient se tedy pohyboval v intervalu 0 až 1. Získaným koeficientem byl vynásoben počet bodů, získaných z předchozího hodnocení. Nejlépe dopadly ty ŘM a řezné podmínky, které dosáhly největšího počtu bodů.

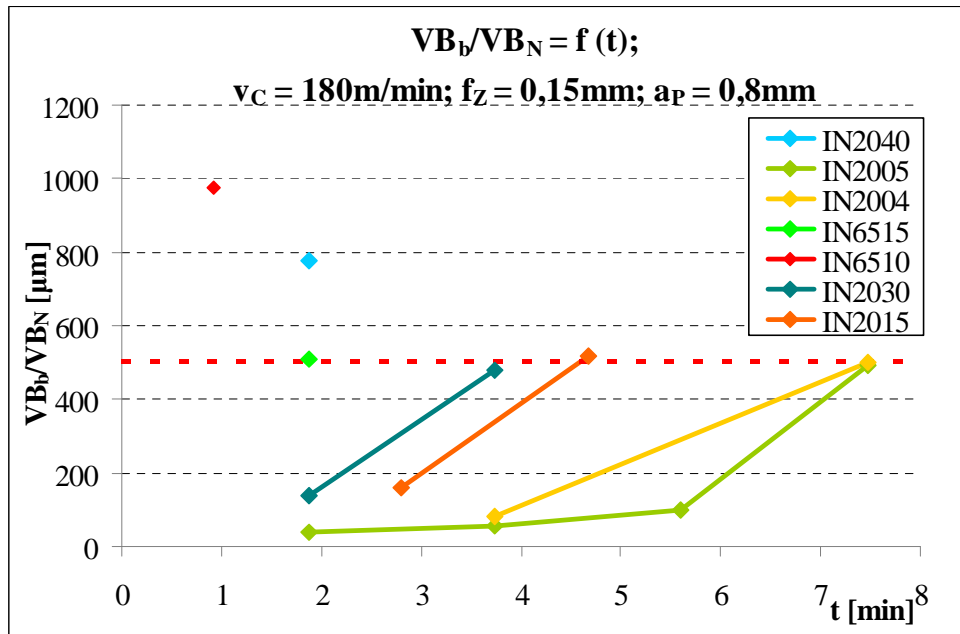
Tento způsob hodnocení mohl být proveden jen proto, že ani v jediném případě nebylo překročeno žádné z kritérií a z teoretického hlediska jsou všechny dosažené výsledky akceptovatelné!

P-4 Předdokončování

P-4.1 Trvanlivost řezného nástroje - preexperiment

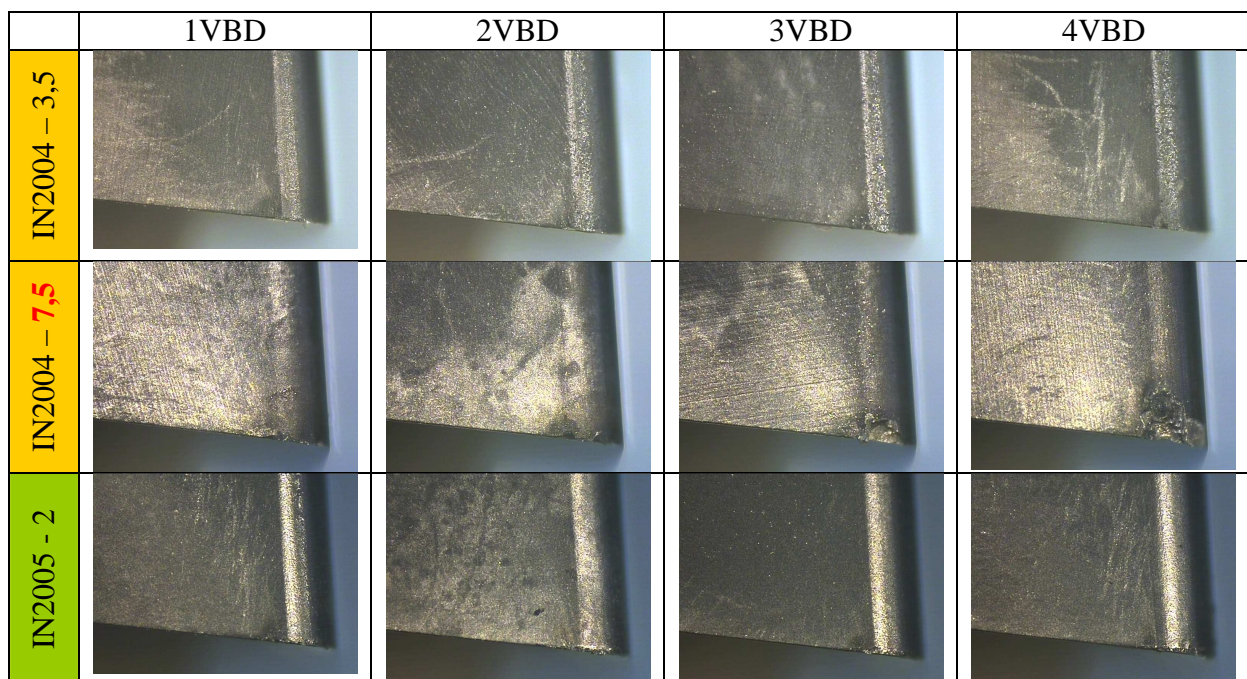
Průběhy opotřebení v závislosti na čase obrábění jsou zobrazeny v grafu na **obr.P4-1**. Hodnoty vynesené v grafu udávají buď rovnoměrné opotřebení, nebo maximální opotřebení. Vždy se jedná o hodnotu z nejvíce opotřebené destičky. Proto je také vhodné tento graf porovnat se snímky opotřebení. Tyto snímky jsou zobrazeny v tabulce **P4-1**. V některých případech jsou v tabulce zobrazeny dvě stádia opotřebení VBD. Ve spojení s grafem na **obr.P4-1** připadají tyto fotografie vždy do krajních bodů jednotlivých křivek. V levém sloupci tabulky je uvedeno označení sledovaného řezného materiálu a také přibližný čas obrábění, po kterém byly VBD proměřeny.

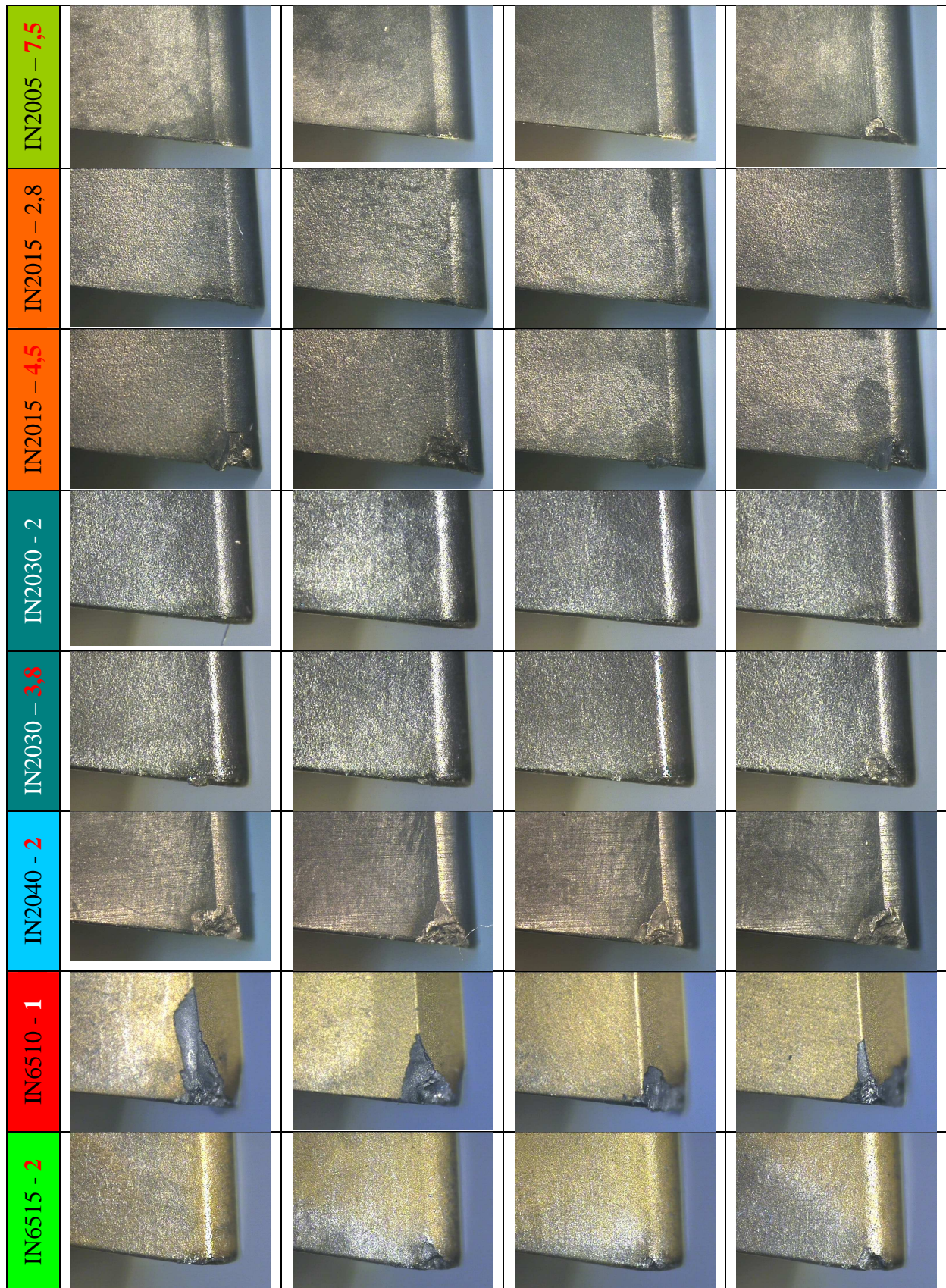
Všechny testované řezné materiály se opotřebovaly ve tvaru vrubu. Vrub začal vznikat vždy ve stejné vzdálenosti od špičky nástroje. Tato vzdálenost byla shodná s nastavenou hloubkou řezu $a_p=0,8$ mm. Právě v tomto místě je řezný břit nejvíce zatěžován.



Obr.P4-1 Závislost maximálního opotřebení na čase obrábění pro jednotlivé řezné materiály

Nejlepších výsledků bylo dosaženo s IN2004 a IN2005. Ty dosáhly celkově nejvyšší trvanlivosti. Nejhorších výsledků bylo dosaženo s IN2040, IN6510 a IN6515. Ty dosáhly kritériálního opotřebení během necelých dvou minut. Porovnáme-li opotřebení na výše zmiňovaných řezných materiálech, zjistíme, že typy IN2040 a IN6515 se opotřebily v krátkém čase velmi intenzivně a jedná se o vrubové opotřebení. V případě IN6510 došlo k celkové destrukci břitů, kdy se ostří v místě řezu vyštívalo. Vysvětlení tohoto opotřebení je nasnadě. Jak je z fotografií patrné, špička břitu v případě IN6510 není rádius, ale zkosení pod úhlem 45°. V případě rádiusu se zatížení vždy rovnoměrněji rozkládá. Proto také došlo oproti špičkám ve tvaru rádiusu k větší koncentraci zatížení a odlišnému poškození ostří.

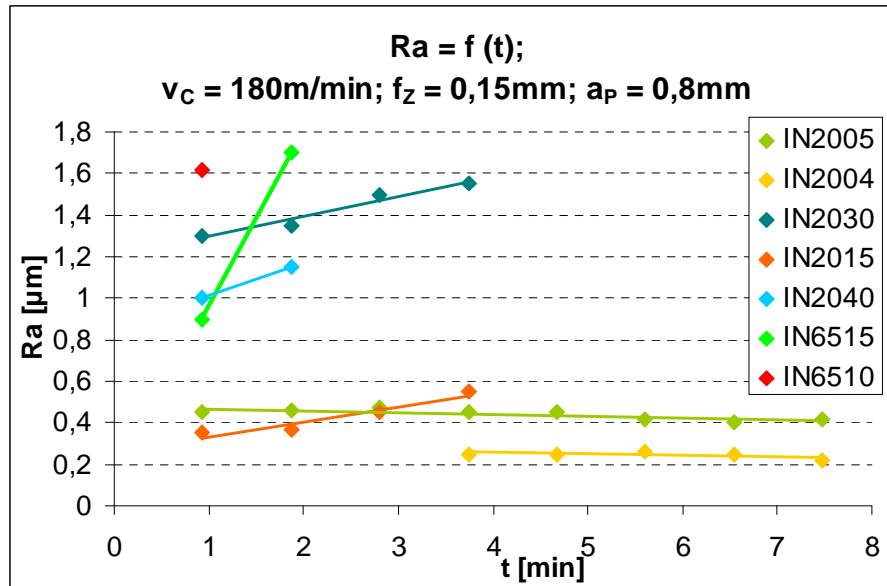




Tab.P4-1 Opatření bříty v závislosti na čase obrábění pro jednotlivé řezné materiály

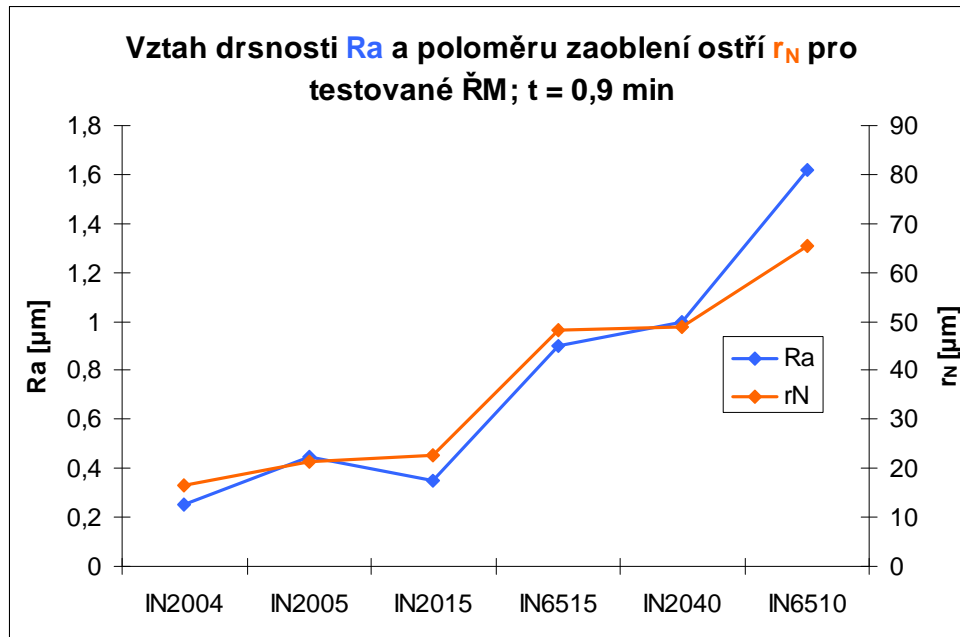
P-4.2 Drsnost obrobeného povrchu - preexperiment

Dalším sledovaným parametrem v rámci pre-experimentu byla drsnost obrobeného povrchu. Ta byla v tomto případě hodnocena pomocí parametru R_a . Závislost R_a na čase obrábění je zobrazena v grafu na **obr.P4-2**. Obrobený povrch byl také nafocen. Tyto fotografie jsou v tabulce **P4-2**. Také zde je u jednotlivých snímků uveden kromě označení řezného materiálu i čas obrábění, po kterém byl snímek pořízen.



Obr.P4-2 Závislost drsnosti obrobeného povrchu na čase obrábění pro jednotlivé řezné materiály

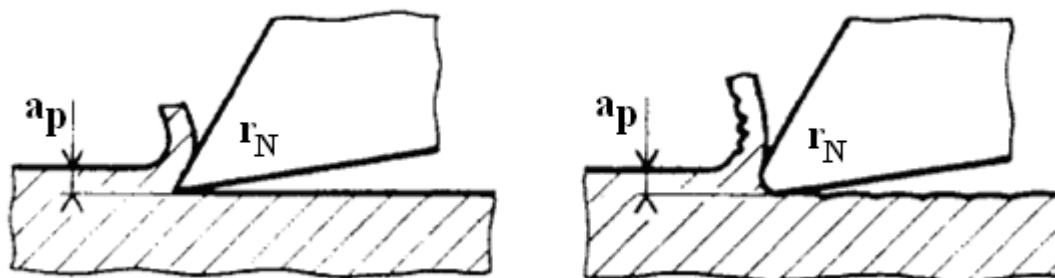
Z grafu je patrné, že nejlepší drsnosti obrobeného povrchu bylo dosaženo s IN2004, IN2005 a IN2015. Ostatní typy z hlediska hodnocení kvality obrobeného povrchu selhaly. U IN2005 a IN2004 se v závislosti na čase obrábění hodnota R_a držela na konstantních hodnotách. S ohledem na výslednou drsnost obrobeného povrchu bylo také potvrzeno, že VBD typu IN2004 a IN2005 jsou vhodné pro obrábění v oblasti předdokončování a budou tedy podrobeny dalšímu testování. Poměrně dobrých výsledků z hlediska drsnosti obrobeného povrchu bylo také dosaženo v případě IN2015. Rozhodujícím kritériem však byla trvanlivost, a ta byla poloviční oproti IN2004 a IN2005.



Obr.P4-3 Vztah drsnosti R_a a poloměru zaoblení ostří r_N pro testované řezné materiály; čas obrábění $t = 0,9$ min

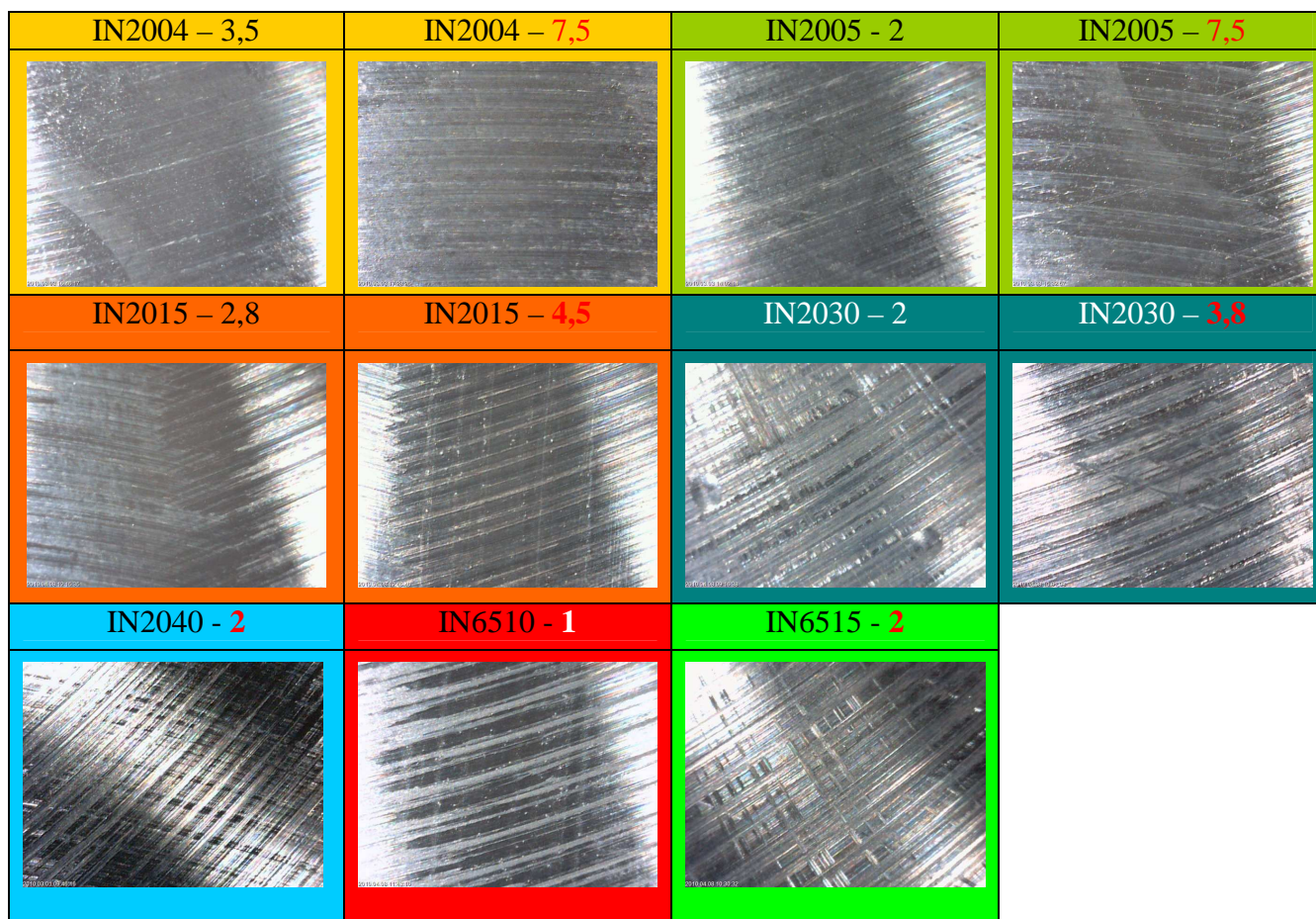
Jako v případě trvanlivosti nástroje, byl i v případě drsnosti obroběného povrchu zjištěn vztah mezi poloměrem zaoblení ostří r_N a dosaženou drsností obroběného povrchu R_a . Tento vztah je zobrazen v grafu na obrázku **P4-3**. Tento graf platí (kromě IN2004) pro čas obrábění $t = 0,9$ min., což znamená, že dosažená drsnost je tu ovlivněna více poloměrem zaoblení ostří než opotřebením břitu, které se začalo projevovat až déle, viz porovnání grafů na obrázcích **P4-1 a P4-2**.

Z **obr.P4-3** je patrné, že čím větší je poloměr zaoblení ostří, tím horší je dosahovaná drsnost obroběného povrchu. To potvrzuje obrázek **P4-4**. Větší poloměr zaoblení ostří r_N totiž způsobuje větší plastickou deformaci obroběného povrchu a tím, kromě většího zpevnění povrchové vrstvy, také větší poškození obroběného povrchu. To se projeví v první řadě zhoršením drsnosti obroběného povrchu [67].



Obr.P4-4 Vliv poloměru zaoblení ostří na vznikající třísku a obroběný povrch [67]

Porovnání obroběných povrchů pomocí jejich snímků (viz. tabulka **P4-2**) by mohlo být spíše subjektivní záležitostí, avšak v konfrontaci se zjištěnou drsností lze i zde potvrdit, že nejlepšího stavu obroběného povrchu z hlediska vizuálního bylo dosaženo s IN2004 a IN2005.



Tab.P4-2 Obrobené povrchy v závislosti na čase obrábění pro jednotlivé řezné materiály; zvětšení 50x

P-4.3 Kapilární defektoskopická zkouška na mikrotrhliny - preexperiment

Při praktickém pozorování reálného procesu obrábění tělesa parní turbíny v podniku bylo zjištěno, že se v obráběném materiálu vyskytují vady (*obr.P4-5*). Vady byly zjištěny i ve zkušebním obrobku, který pocházel ze stejné tavby jako reálné těleso turbíny.



Obr. P4-5 Makroskopická vada v reálném tělese (vlevo) a mikroskopické vady v experimentálním obrobku

Kvůli předpokládané přítomnosti těchto vad v celém experimentálním obrobku bylo upuštěno od plánované rentgenografické defektoskopické zkoušky ke zjištění případných trhlin, neboť výsledný snímek by vlivem značného množství těchto vad nebyl řádně čitelný a tím věrohodný. Avšak

z důvodu přítomnosti těchto vad v materiálu bylo nutné pečlivě sledovat obrobený povrch v průběhu celého experimentálního měření, neboť jedním z předpokladů bylo, že právě tyto vady by mohli fungovat jako iniciátor trhlin. Byla použita nedestruktivní metoda testování, tzv. kapilární zkouška (princip na *obr.P4-6*).

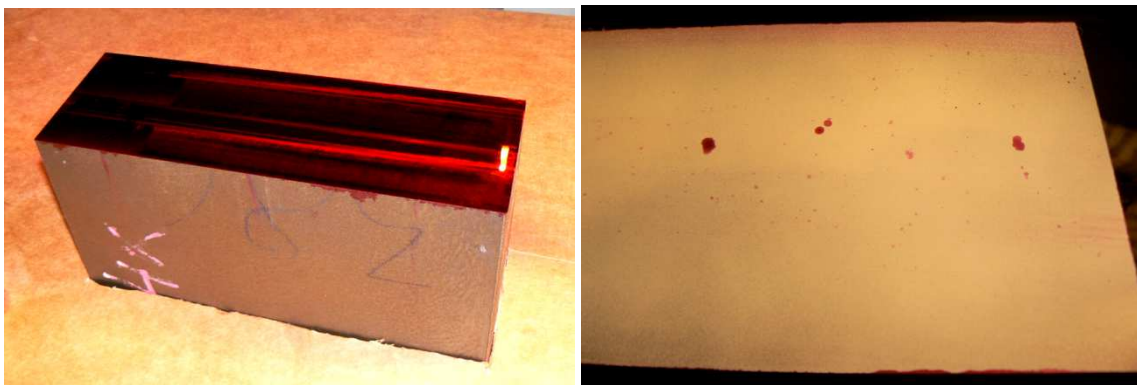


Obr.P4-6 Princip kapilární defektoskopické zkoušky [87]

Postup použití této zkoušky je následující. Obrobený povrch byl vždy před testováním pečlivě očištěn. Byla na něj nanesena detekční kapalina (penetrant), která byla na povrchu ponechána 30 minut (*obr.P4-8a*). Poté byl povrch znovu pečlivě očištěn a byla nanesena indikační kapalina (vývojka). Ta byla na povrchu ponechána také 30 minut. Následně byla provedena vizuální kontrola obrobeného povrchu. Zkouška vždy potvrdila přítomnost zjištěných vad (*obr.P4-8b*), avšak ani v jednom případě nebylo zjištěno, že by tyto vady fungovali jako iniciátor trhlin, nebo že by vlivem obrábění vznikalo nějaké jiné poškození obrobeného povrchu. To platí pro všechny testované nástrojové materiály za všech testovaných řezných podmínek.



Obr. P4-7 Přípravky pro kapilární zkoušku - zleva: čistič, penetrant, vývojka; výrobce: Sherwin Inc.



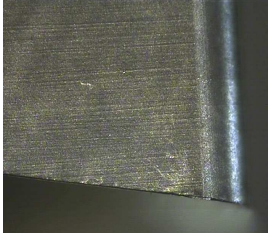
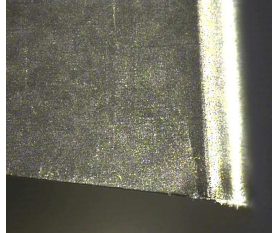
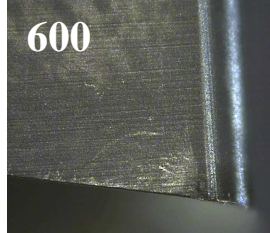
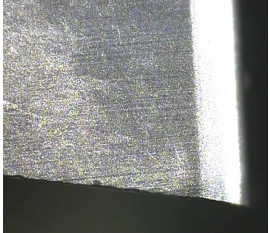
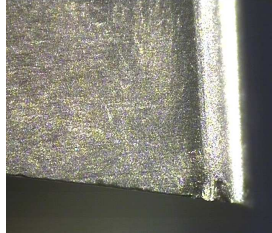
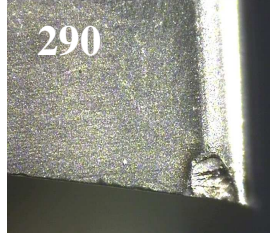
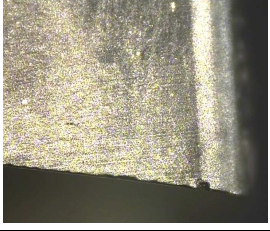
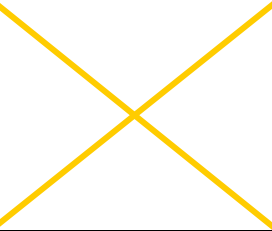
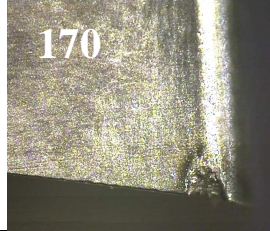
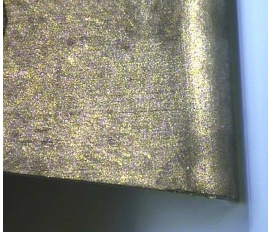
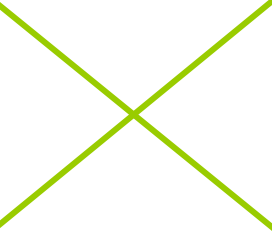
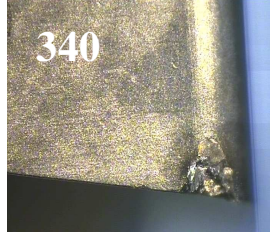
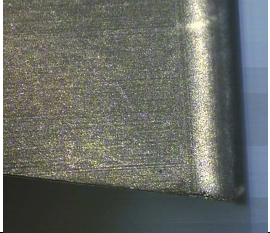
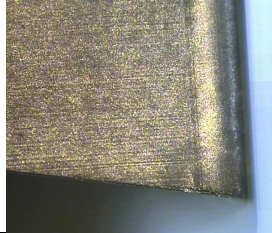
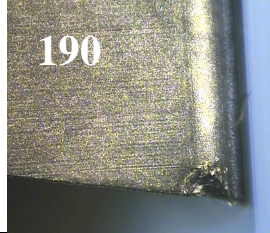
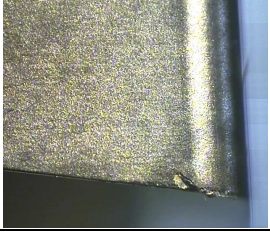
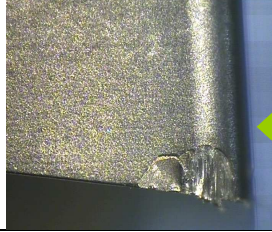
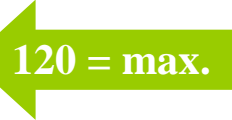
Obr.P4-8 : a) nanesený penetrant na obrobeném povrchu; b) povrch po provedené zkoušce

Pozn: Z důvodu značné časové náročnosti této testovací metody bylo v průběhu pokračování experimentů od jejího použití postupně upouštěno. V posledních fázích experimentálního měření bylo toto testování používáno namátkově, nejčastěji v případech, kdy docházelo k obrábění za vyšších řezných podmínek a navíc při vyšším opotřebení nástroje, tedy v případech, kdy byly největší předpoklady případného poškození obrobeného povrchu.

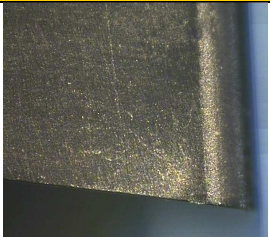
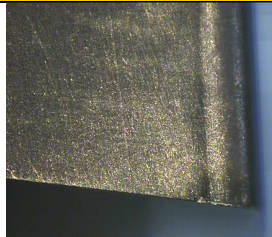

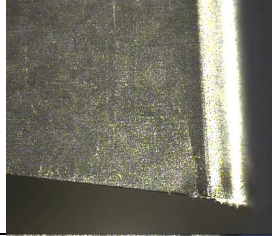
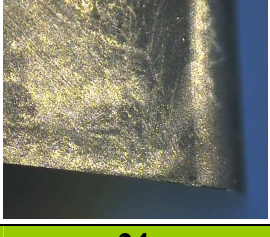
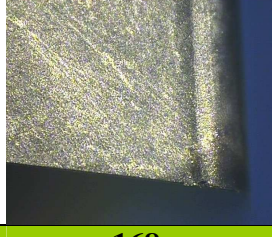
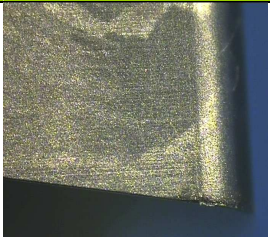
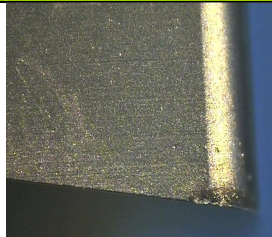
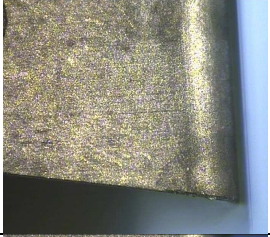
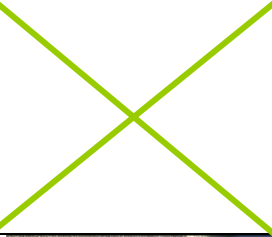
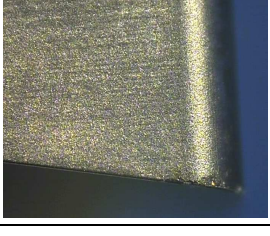
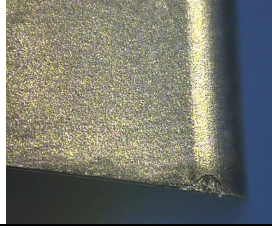
P-4.4 Změna tvrdosti obrobeného povrchu - preexperiment

V průběhu obrábění byla také zjišťována tvrdost obrobeného povrchu, případně její změna. Změna v tvrdosti obrobeného povrchu by totiž mohla poukázat na jeho zpevnování. Tvrdost byla zjišťována pomocí přenosného dílenského tvrdoměru. Z důvodu vlastností obráběného materiálu, zejména jeho struktury, která v sobě kombinuje tvrdé fáze martenzitu a měkké fáze feritu nebylo však možné zjistit vliv technologických podmínek na změnu tvrdosti obrobeného povrchu. Ve všech případech měření se tvrdost pohybovala v intervalu 202 až 206 HB. Od sledování změny tvrdosti obrobeného povrchu bylo tedy upuštěno úplně.

P-4.5 Trvanlivost řezného nástroje – experiment

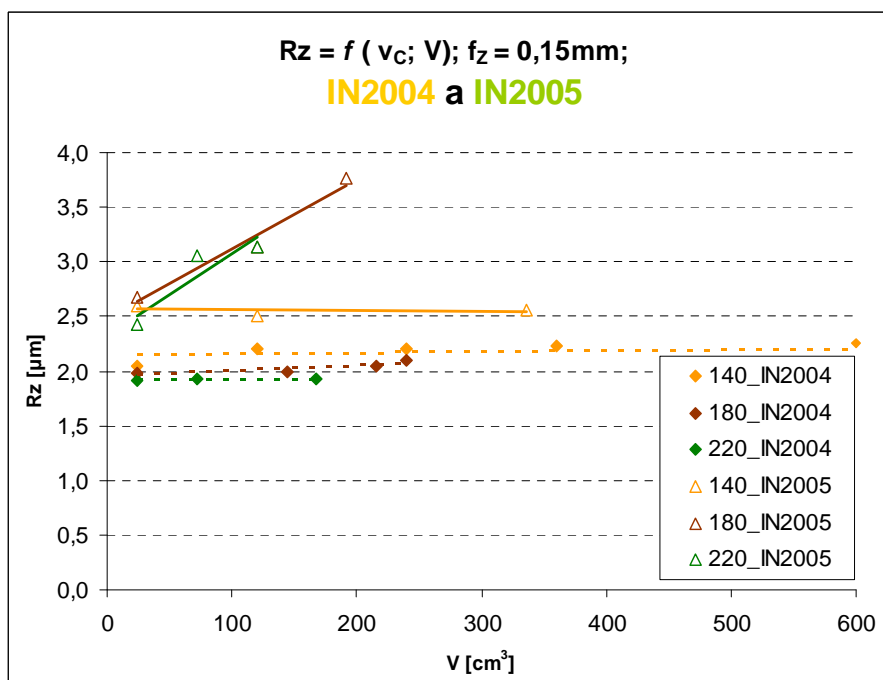
	v_c [m/min]	Objem odebraného materiálu V [cm ³]		
		24	~240	maximum
IN2004	140			600 
	180			290 
	220			170 
IN2005	v_c [m/min]	24	120	maximum
	140			340 
	180			190 
	220			

Tab.P4-3 Opatření břitů v závislosti na řezné rychlosti v_c ; $f_z = 0,15$ mm; IN2004 a IN2005

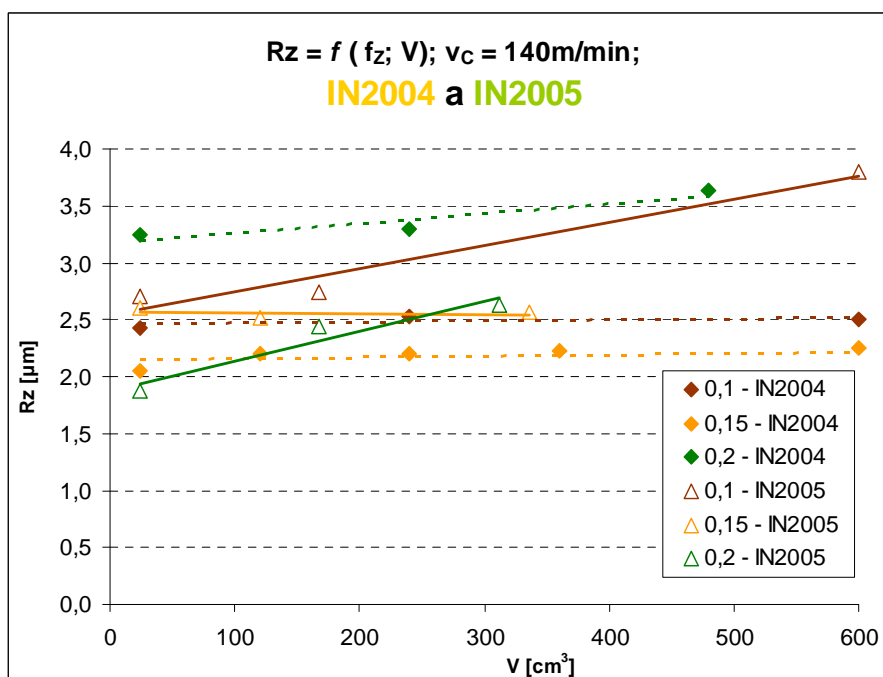
	f_z [mm]	Objem odebraného materiálu V [cm ³]		
		24	240	maximum
IN2004	0,1			600
	0,15			600
	0,2			480
IN2005	f_z [mm]	24	168	maximum
	0,1			600
	0,15			340
	0,2			312

Tab.P4-4 Opořebenění břitu v závislosti na posuvu f_z ; $v_c = 140$ m/min; IN2004 a IN2005

P-4.6 Drsnost obrobeneho povrchu - experiment



Obr.P4-9 Závislost drsnosti obrobeneho povrchu na změně v_c a objemu odebraného materiálu V; f_z = 0,15 mm; IN2004 a IN2005



Obr.P4-10 Závislost drsnosti obrobeneho povrchu na a změně f_z a objemu odebraného materiálu; v_c = 140 m/min; IN2004 a IN2005

P-4.7 Vliv řezných podmínek na celkové silové zatížení – experiment

$F_{IN2004} = 74 \cdot v_C^{0,4658} \cdot V^{0,0483} [N]$			
F – koeficienty funkce a jejich významnost			oblast pracovních podmínek
konstanta; exponenty	hodnoty koeficientů	významnost koeficientů	IN2004 $f_Z = 0,15 \text{ mm}$ $v_C = 140 - 180 \text{ m/min}$ $a_p = 0,8 \text{ mm}$
c_F	74	<i>velmi výrazná</i>	
n_F	0,4658	<i>velmi výrazná</i>	
y_F	0,0483	<i>velmi výrazná</i>	
významnost funkce		<i>velmi výrazná</i>	
koeficient determinace: 0,89 → 89 % naznačuje <i>velmi silnou závislost</i>			

Tab.P4-5 Výsledky vyrovnávání závislostí a statistické analýzy při $f_Z=0,15\text{mm}$; IN2004

$F_{IN2005} = 11 \cdot v_C^{0,8139} \cdot V^{0,0898} [N]$			
F – koeficienty funkce a jejich významnost			oblast pracovních podmínek
konstanta; exponenty	hodnoty koeficientů	významnost koeficientů	IN2005 $f_Z = 0,15 \text{ mm}$ $v_C = 140 - 180 \text{ m/min}$ $a_p = 0,8 \text{ mm}$
c_F	11	<i>velmi výrazná</i>	
n_F	0,8139	<i>výrazná</i>	
y_F	0,0898	<i>výrazná</i>	
významnost funkce		<i>velmi výrazná</i>	
koeficient determinace: 0,75 → 75 % naznačuje <i>silnou závislost</i>			

Tab. P4-6 Výsledky vyrovnávání závislostí a statistické analýzy při $f_Z=0,15\text{mm}$; IN2005

$F_{IN2004} = 3376 \cdot f_Z^{0,6463} \cdot V^{-0,0153} [N]$			
F – koeficienty funkce a jejich významnost			oblast pracovních podmínek
konstanta; exponenty	hodnoty koeficientů	významnost koeficientů	IN2004 $f_Z = 0,1 - 0,2 \text{ mm}$ $v_C = 140 \text{ m/min}$ $a_p = 0,8 \text{ mm}$
c_F	3376	<i>velmi výrazná</i>	
n_F	0,6463	<i>velmi výrazná</i>	
y_F	-0,153	<i>výrazná</i>	
významnost funkce		<i>velmi výrazná</i>	
koeficient determinace: 0,98 → 98 % naznačuje <i>velmi silnou závislost</i>			

Tab. P4-7 Výsledky vyrovnávání závislostí a statistické analýzy při $v_C = 140 \text{ m/min}$; IN2004

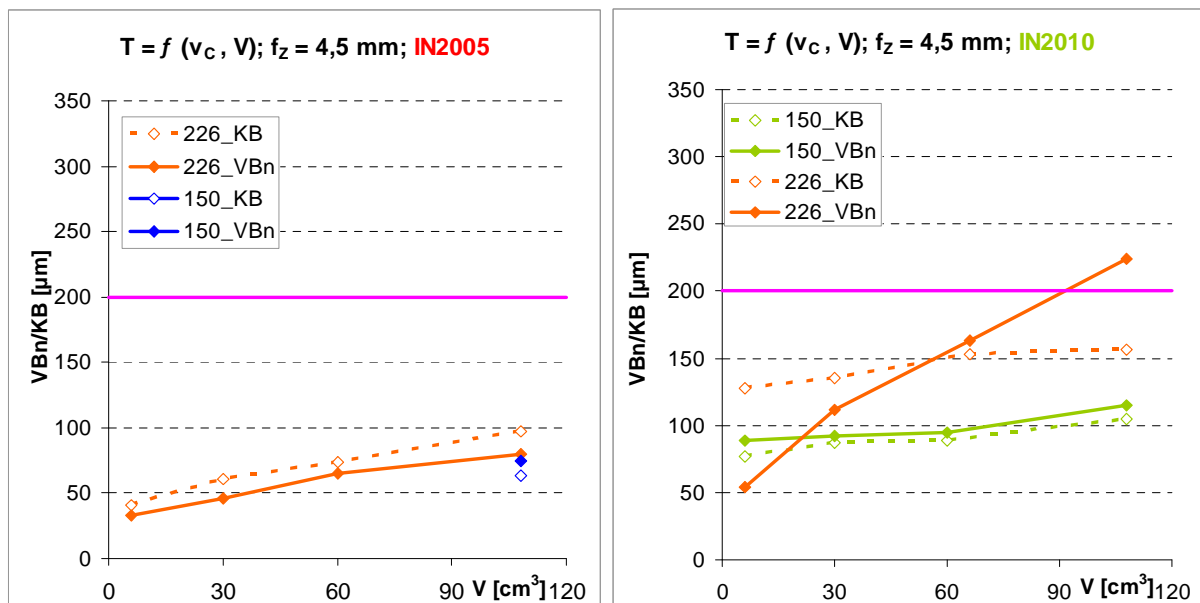
$F_{IN2005} = 4370 \cdot f_z^{0,8371} \cdot V^{0,0136} [N]$		
F – koeficienty funkce a jejich významnost		oblast pracovních podmínek
konstanta; exponenty	hodnoty koeficientů	významnost koeficientů
c_F	4370	velmi výrazná
n_F	0,8371	velmi výrazná
y_F	0,0136	výrazná
významnost funkce		velmi výrazná
koeficient determinace: 0,98 → 98 % naznačuje velmi silnou závislost		
IN2005 $f_z = 0,1 - 0,2 \text{ mm}$ $v_c = 140 \text{ m/min}$ $a_p = 0,8 \text{ mm}$		

Tab. P4-8 Výsledky vyrovnávání závislostí a statistické analýzy při $v_c = 140 \text{ m/min}$; IN2005

P-5 Dokončování

P-5.1 Trvanlivost řezného nástroje - preexperiment

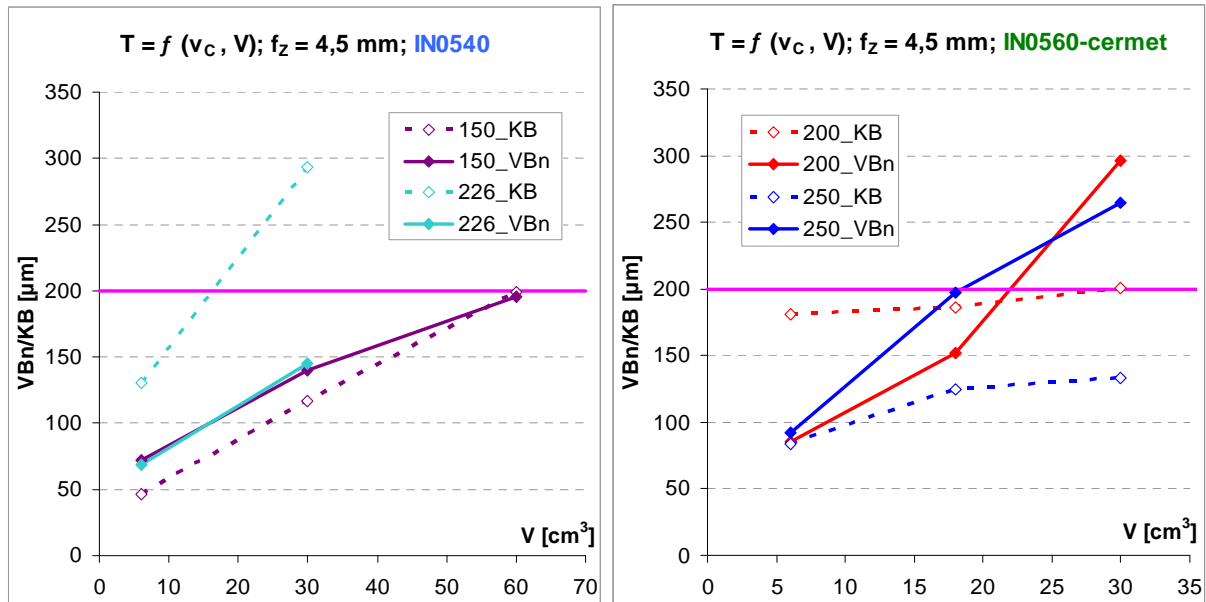
Na následujících čtyřech grafech jsou vyobrazeny průběhy opotřebení pro některé z testovaných řezných materiálů. Průběhy jsou provedeny v závislosti na změně řezné rychlosti v_c a zvětšujícímu se objemu odebraného materiálu V . Některé řezné materiály dosáhly kritériálního opotřebení v poměrně krátké době, proto u nich nebylo možné provést potřebný počet měření opotřebení, nutný pro grafické vyobrazení.



Obr.P5-1 Průběhy opotřebení na čele (KB) a hřbetě (VBn) nástroje v závislosti na změně řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu V ; IN2005 a IN2010

Na **obr.P5-1** jsou zobrazeny průběhy opotřebení pro slinuté karbidy typu IN2005 (vlevo) a IN2010 (vpravo). V případě IN2005 se břit řezného nástroje opotřebovával rovnoměrně na čele i na hřbetě nástroje. Vliv řezné rychlosti byl v porovnání s ostatními nástroji nepatrný. Ani v jednom případě nebylo dosaženo stanovené hodnoty kritériálního opotřebení 0,2 mm. Testování tedy bylo ukončeno z důvodu dosažení potřebného objemu odebraného materiálu. V případě IN2010 je již lépe patrný vliv řezné rychlosti v_c . Při vyšší řezné rychlosti se břit opotřebovával více, a v případě opotřebení na hřbetě VBn také intenzivněji. Při nižší řezné rychlosti se břit opotřebovával rovnoměrně jak na čele, tak na hřbetě.

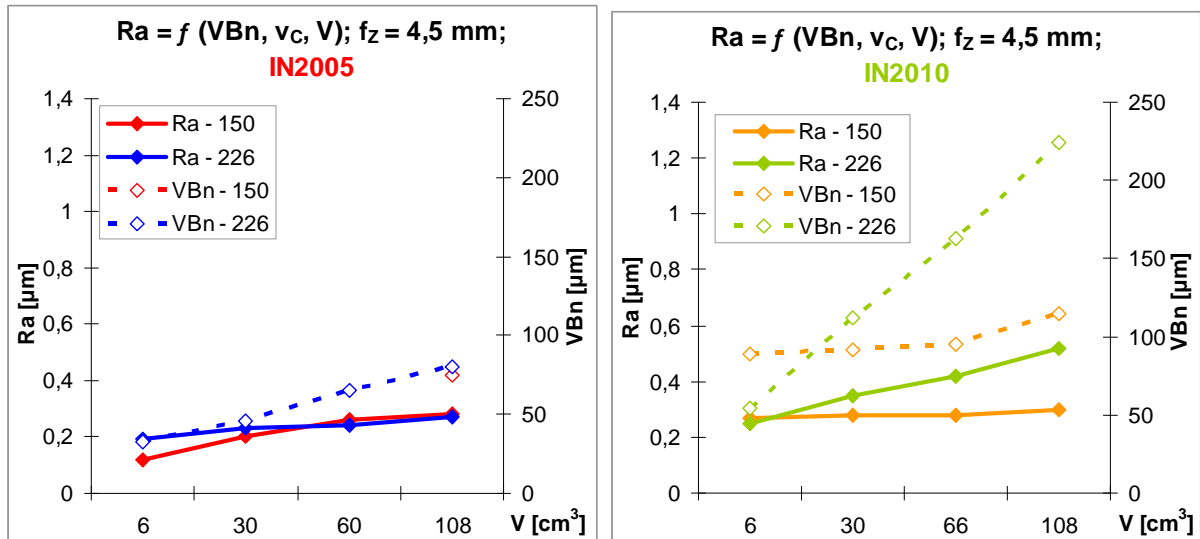
Na **obr.P5-2** jsou zobrazeny průběhy opotřebení pro slinutý karbid typu IN0540 (vlevo) a cermet typu IN0560 (vpravo). V případě IN0540 je patrné, že oproti karbidům na **obr.P5-1** se opotřebovával velmi intenzivně, neboť hodnoty kritériálního opotřebení bylo dosaženo nejdříve po dosažení hodnoty objemu odebraného materiálu $V = 60 \text{ cm}^3$. V případě vyšší řezné rychlosti to bylo ještě dříve. Při nižší řezné rychlosti se čelo i hřbet opotřebovávaly velmi podobně. Cermet typu IN0560 se opotřebovával také velmi rychle. Vyšších hodnot opotřebení bylo dosaženo při obrábění vyšší řeznou rychlostí. Břit VBD se opotřebovával intenzivněji na hřbetě než na čele.



Obr.P5-2 Průběhy opotřebení na čele (KB) a hřbetě (VBn) nástroje v závislosti na změně řezné rychlosti v_c a objemu odebraného materiálu V ; IN0540 a IN0560

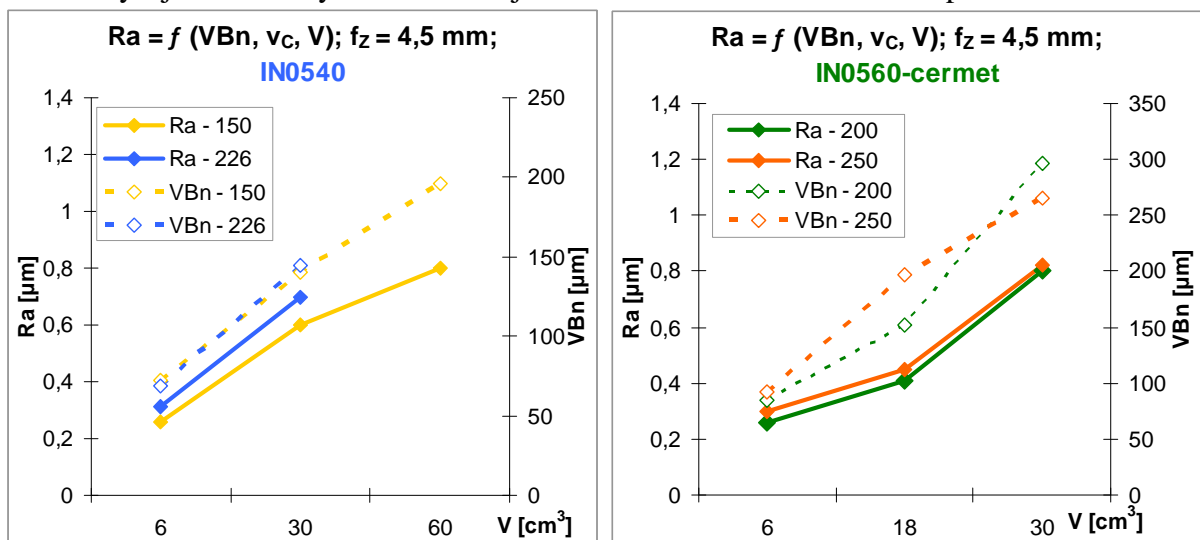
P-5.2 Drsnost obrobeného povrchu - preexperiment

Na obrázcích **P5-4** a **P5-5** je zobrazena závislost drsnosti obrobeného povrchu na opotřebení nástroje v závislosti na změně řezné rychlosti v_c a zvyšujícím se objemu odebraného materiálu V pro některé testované řezné materiály. Plnými čarami jsou vyobrazeny průběhy drsnosti a čárkovanými čarami jsou vyjádřeny průběhy opotřebení. Z grafů jednoznačně vyplývá, že velikost opotřebení hřbetu nástroje VBn přímo ovlivňuje drsnost obrobeného povrchu a platí, že čím větší je tato hodnota opotřebení, tím horší je drsnost obrobeného povrchu, v tomto případě hodnocena parametrem R_a .

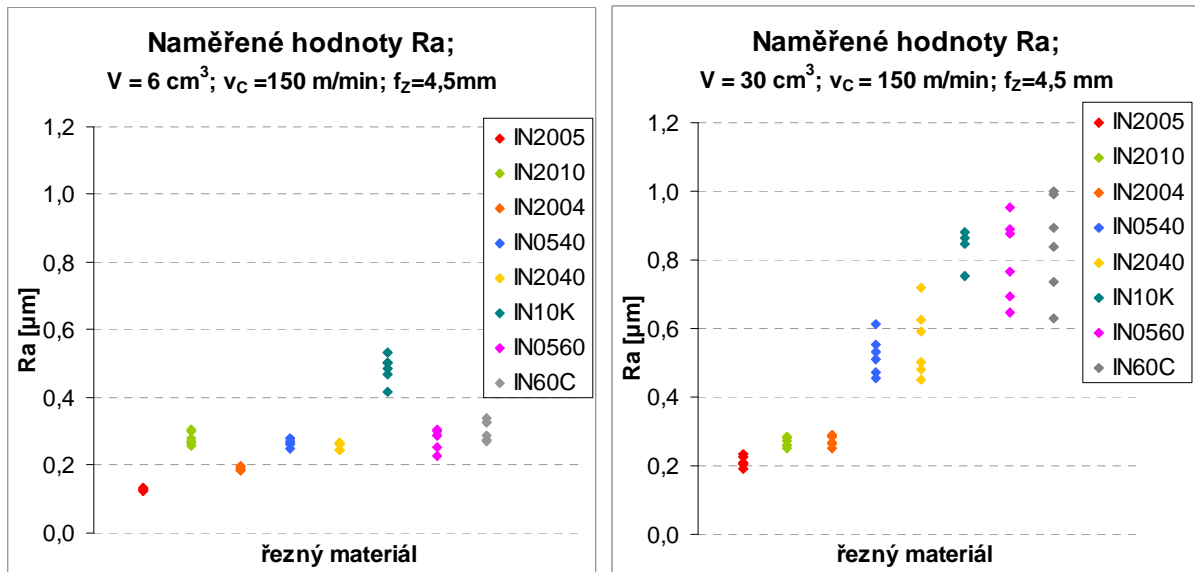


Obr.P5-4 Vztah drsnosti obroběného povrchu Ra a opotřebení na hřbetě nástroje VBn; IN2005 (vlevo) a IN2010 (vpravo)

Zvýšení řezné rychlosti v_c má negativní vliv na trvanlivost nástroje. Ten se intenzivněji opotřebovává, proto se se zvyšující řeznou rychlostí zhoršuje i dosažená drsnost obroběného povrchu.



Obr.P5-6 Vztah drsnosti obroběného povrchu Ra a opotřebení na hřbetě nástroje VBn; IN0540 (vlevo) a IN0560 (vpravo)



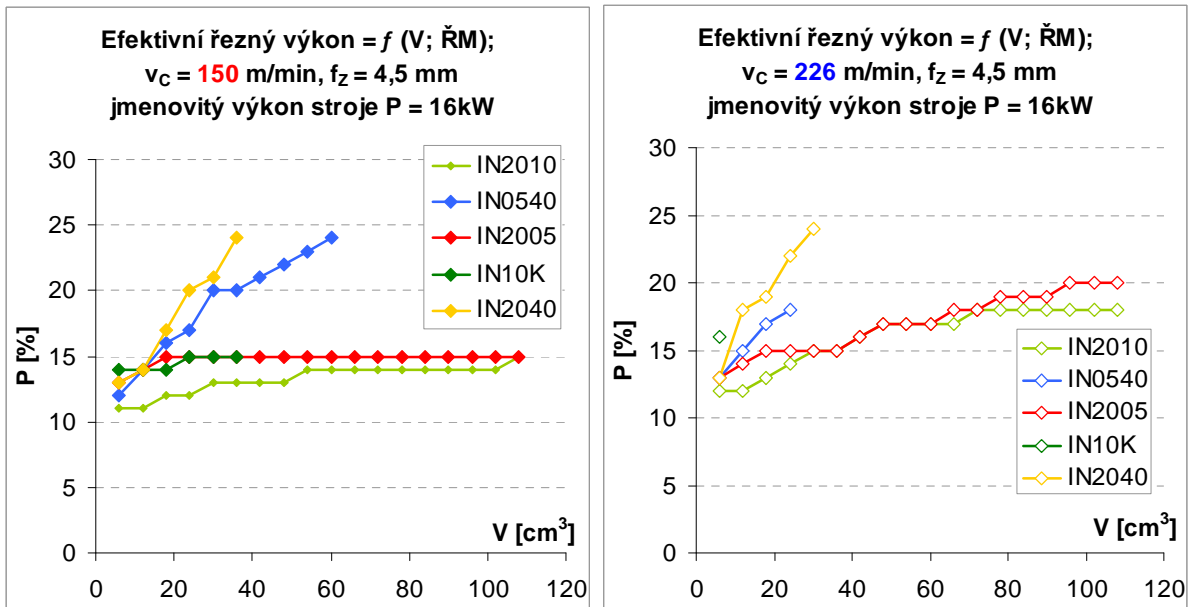
Obr.P5-7 Jednotlivé náměry drsnosti obrobce v závislosti na řezném materiálu a objemu odebraného materiálu obrobku V

Na **obr.P5-7** jsou vyneseny náměry drsnosti obrobce Ra, zjištěné vždy po odebrání určitého objemu materiálu obrobku. Jak bylo vysvětleno v kapitole 7.4, drsnost obrobce byla vždy měřena na celé ploše experimentálního obrobku. Drsnost byla zjišťována celkem v šesti náměrných oblastech. V každé takové oblasti byly provedeny tři náměry, z nichž byla stanovena průměrná hodnota. Tyto průměrné hodnoty jsou vyneseny do grafů na obrázku P5-7. To znamená, že pro každý řezný materiál je v grafu uvedeno celkem šest hodnot.

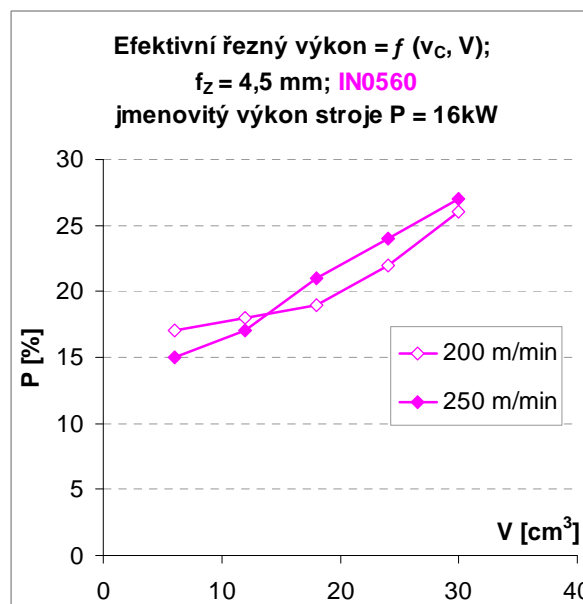
Porovnáním grafů je patrné, že až na výjimky bylo po dosažení objemu odebraného materiálu $V = 6 \text{ cm}^3$ dosaženo na celé ploše experimentálního obrobku (100 x 300 mm) téměř totožných hodnot Ra (myšleno zvláště pro jednotlivé ŘM). Se zvětšujícím se objemem odebraného materiálu V, se pro většinu řezných materiálů drsnost obrobce zhoršovala, a navíc se ještě výrazně zvětšil rozptyl naměřených hodnot Ra. To znamená, že s některými řeznými materiály nebylo dosaženo stejné hodnoty Ra ani na tak malé ploše, jakou byla plocha experimentálního obrobku. Drsnost obrobce v těchto případech nebyla negativně ovlivněna pouze samotným opotřebením břitů nástroje, ale také polohou nástroje vůči obrobku (vjezd do řezu, výjezd z řezu). Stabilnějších výsledků bylo dosaženo s řeznými materiály typu IN2005, IN2004, IN2010 a IN0540.

P-5.3 Efektivní řezný výkon - preexperiment

V grafech na obrázcích P5-8 a P5-9 jsou vykresleny průběhy sledovaného efektivního řezného výkonu pro jednotlivé testované řezné materiály v závislosti na narůstajícím objemu odebraného materiálu V a změně řezné rychlosti v_c . Je patrné, že efektivní řezný výkon je, podobně jako drsnost obrobce, nejvíce závislý na opotřebením břitů nástroje. K tomuto závěru je možné dospět porovnáním těchto průběhů s průběhy opotřebením břitů nástroje na obrázcích v kapitole P-5.1. Ve chvíli, kdy dochází k intenzivnějšímu opotřebením břitů nástroje, dochází také k nárůstu efektivního řezného výkonu. Také z tohoto hlediska se jako nejlepší řezné materiály jeví typy IN2004, IN2005 a IN2010. To je ale prvotně důsledkem jejich odolnosti proti opotřebením.

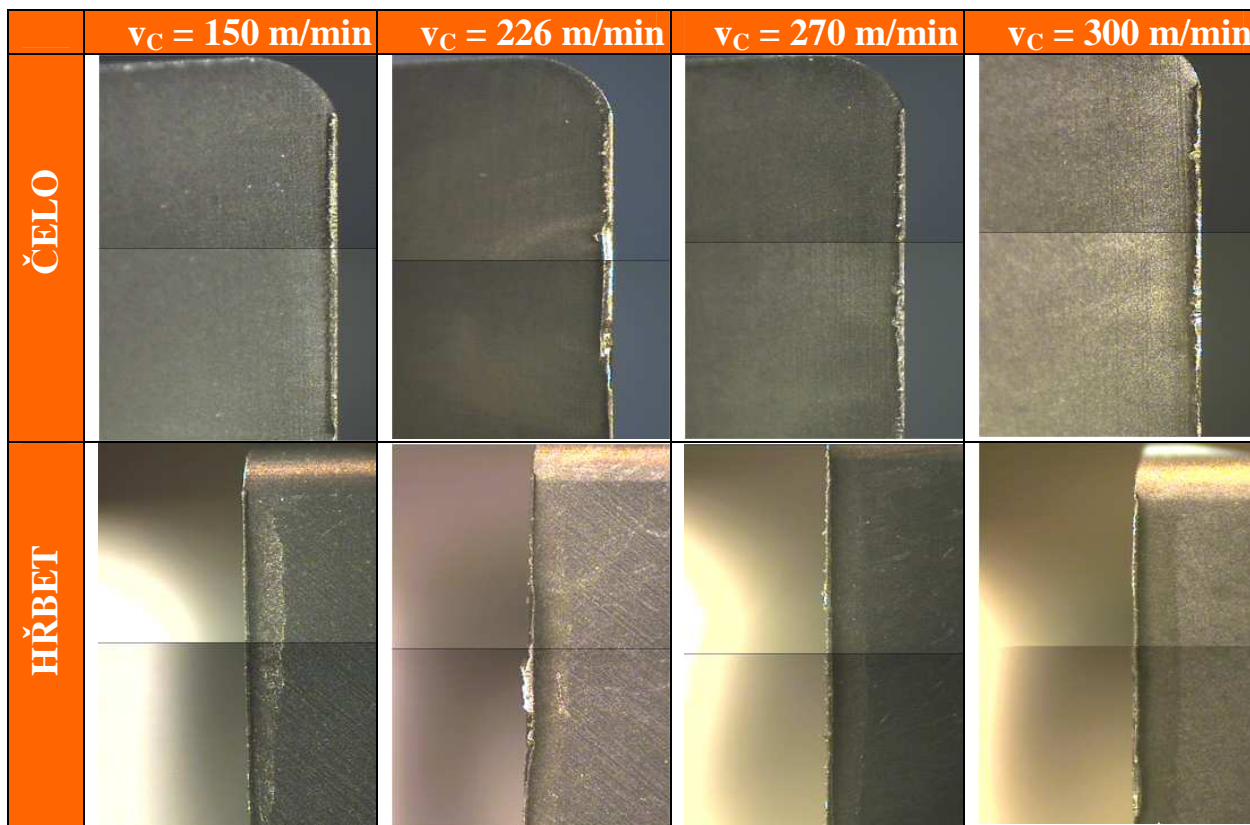


Obr.P5-8 Efektivní řezný výkon v závislosti na objemu odebraného materiálu a řezné rychlosti pro slinuté karbidy

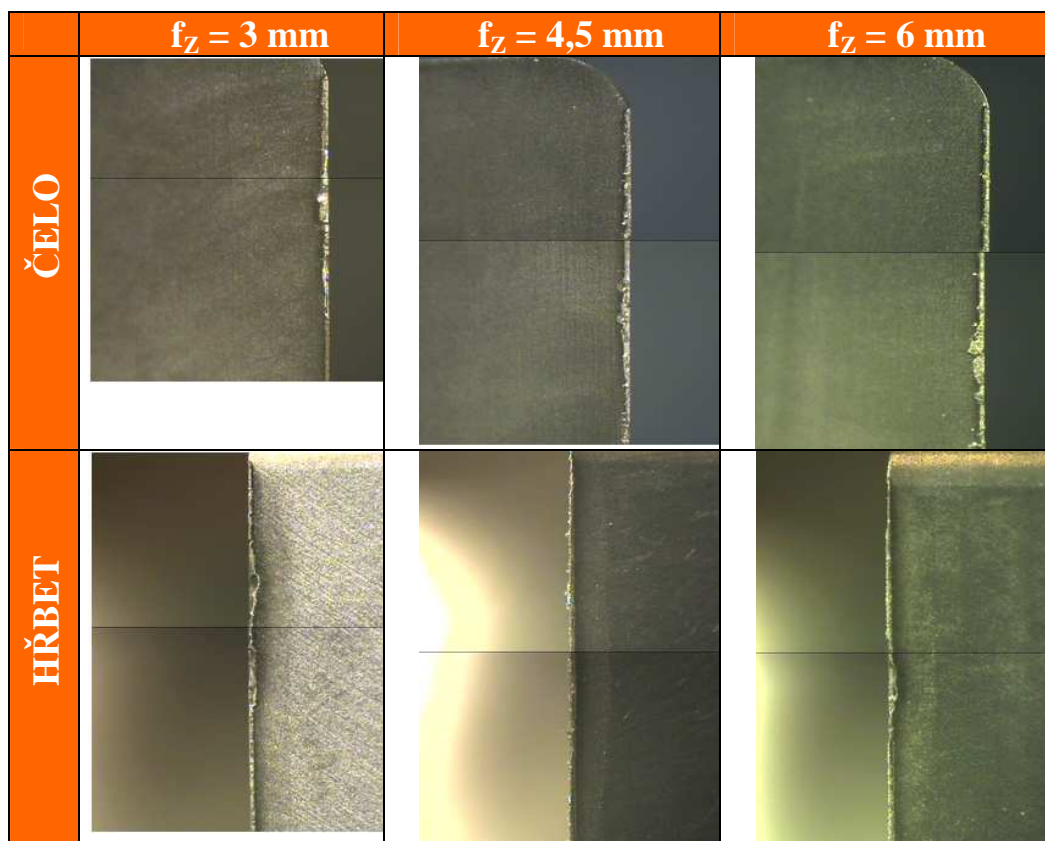


Obr.P5-9 Efektivní řezný výkon v závislosti na objemu odebraného materiálu a řezné rychlosti pro cermet

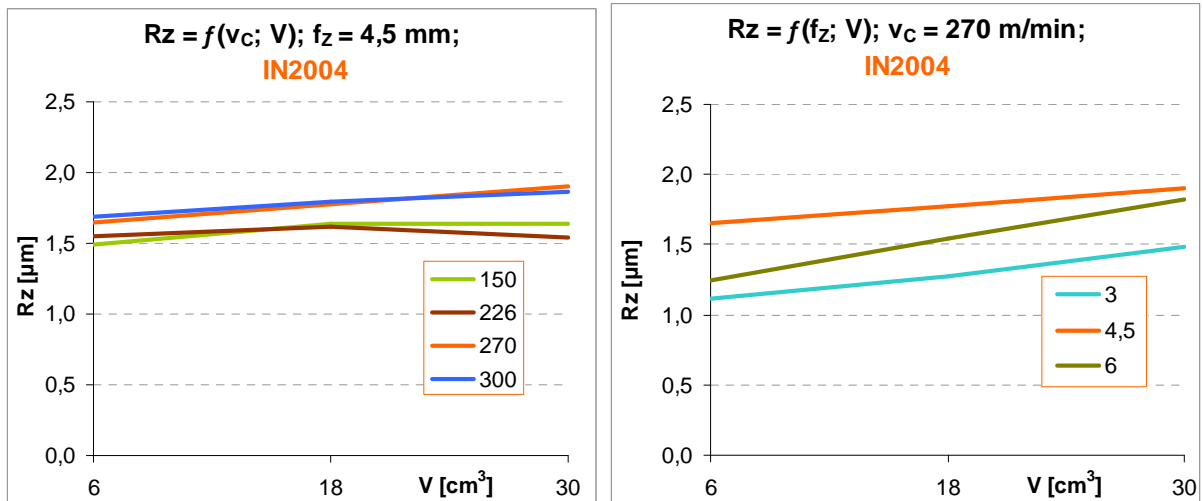
P-5.4 IN2004 - experiment



Tab. P5-1 Opatření VBD v závislosti na řezné rychlosti v_C ; stav po obrobení $V = 30\text{cm}^3$; IN2004



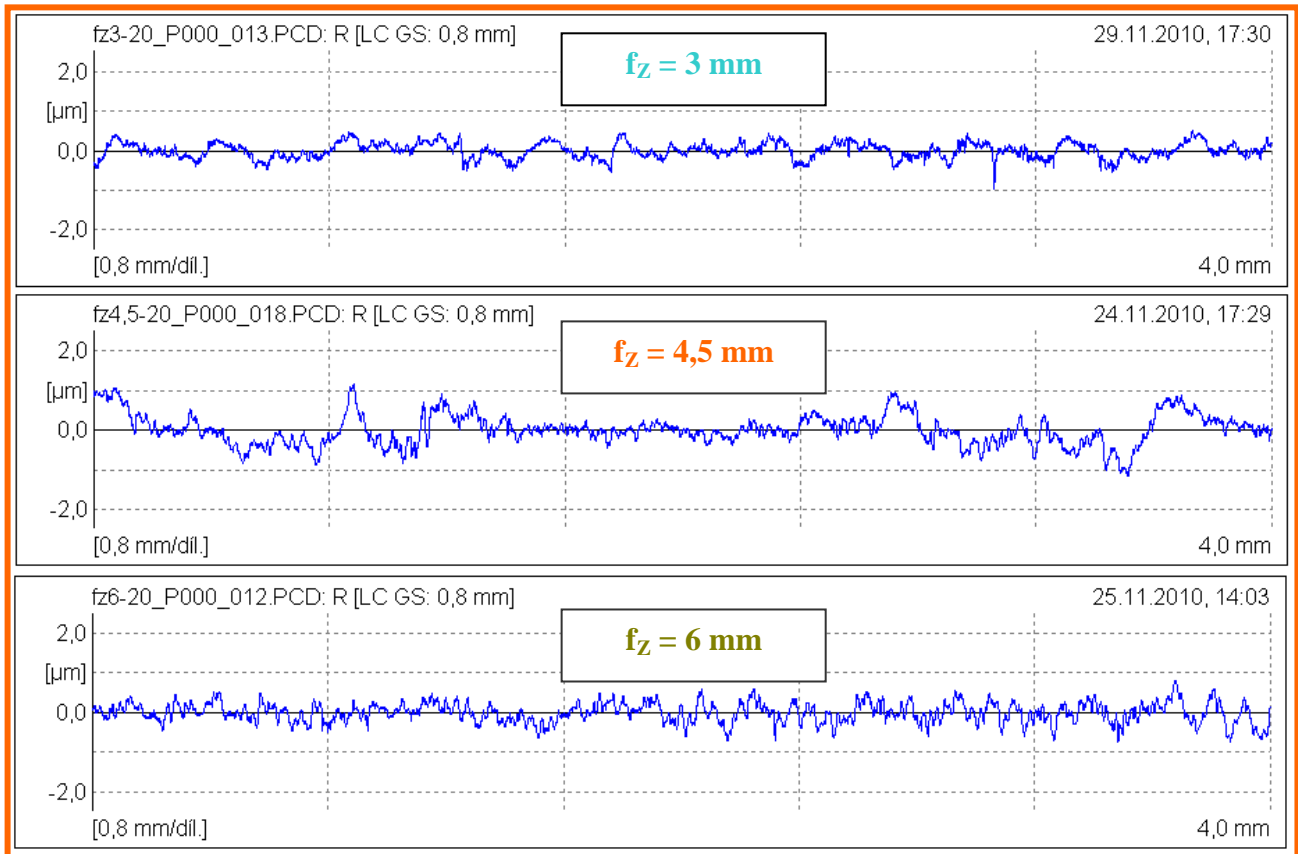
Tab. P5-2 Opatření VBD v závislosti na posuvu f_Z ; stav po obrobení $V = 30\text{cm}^3$; IN2004



Obr.P5-10 Závislost drsnosti obroběného povrchu na objemu odebraného materiálu při změně řezné rychlosti v_c (vlevo) a změně posuvu f_z (vpravo); IN2004



Obr.P5-11 Porovnání profilů obroběného povrchu v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti v_c; f_z = 4,5 mm; V = 6 cm³; IN2004



Obr.P5-12 Porovnání profilů obrobeného povrchu v závislosti na zvyšujícím se posuvu f_z ; $v_C = 270$ m/min; $V = 6$ cm³; IN2004

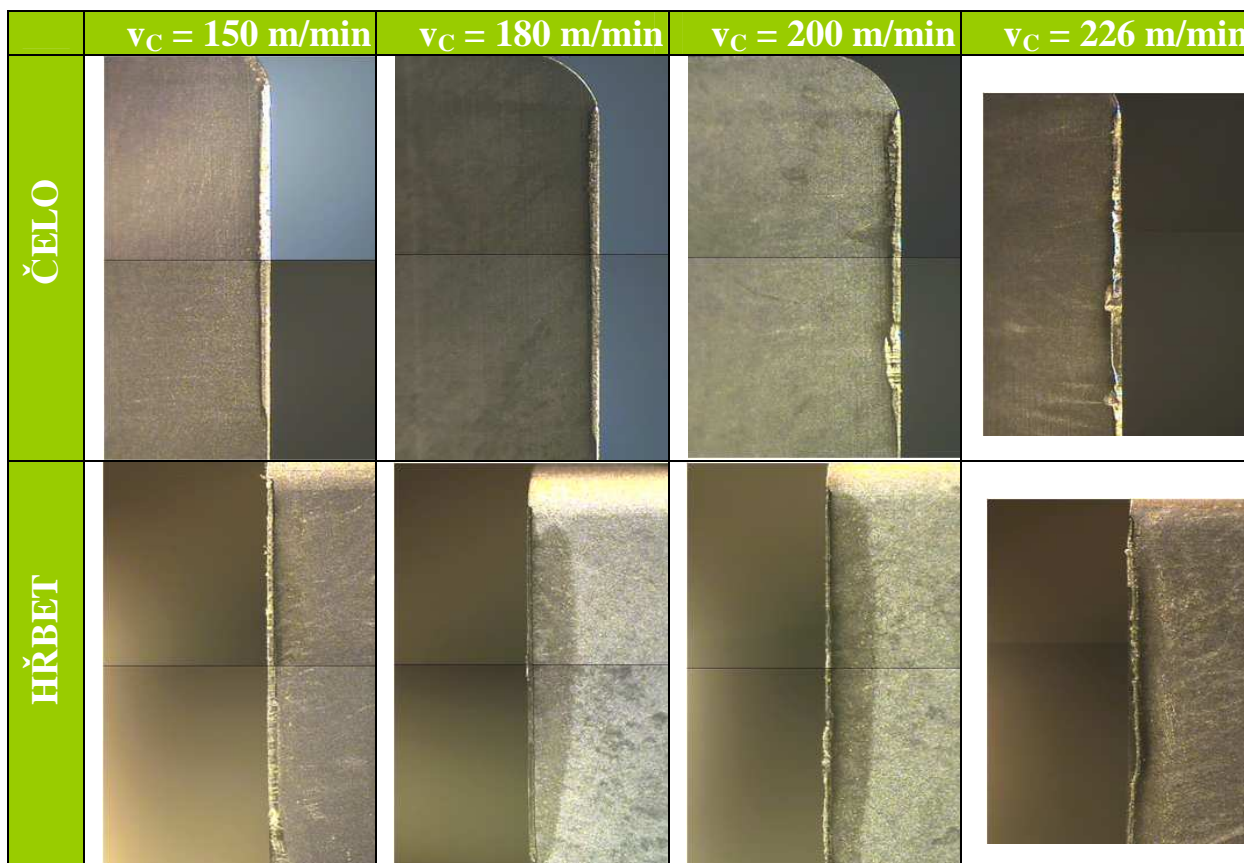
$F_{IN2004} = 107 \cdot v_C^{0,32549} \cdot V^{0,046} [N]$			oblast pracovních podmínek
F – koeficienty funkce a jejich významnost			IN2004 $f_z = 4,5$ mm $v_C = 150 - 300$ m/min $a_p = 0,02$ mm
konstanta; exponenty	hodnoty koeficientů	významnost koeficientů	
c_F	107	<i>velmi výrazná</i>	
n_F	0,32549	<i>velmi výrazná</i>	
y_F	0,046	<i>výrazná</i>	
významnost funkce		<i>velmi výrazná</i>	
koeficient determinace: 0,94 → 94 % naznačuje <i>velmi silná závislost</i>			

Tab.P5-3 Výsledky vyrovnávání závislostí a statistické analýzy při konstantním posuvu f_z ; IN2004

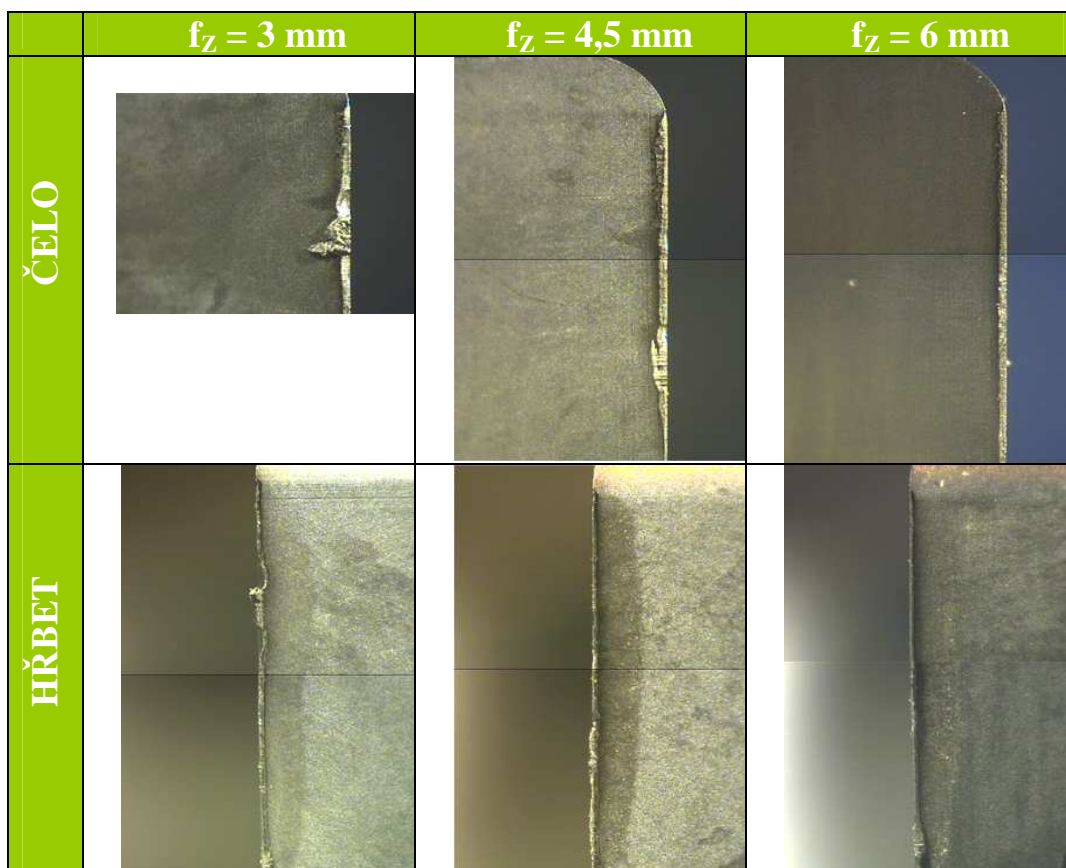
$F_{IN2004} = 304 \cdot f_Z^{0,5448} \cdot V^{0,0342} [N]$		
F – koeficienty funkce a jejich významnost		oblast pracovních podmínek
konstanta; exponenty	hodnoty koeficientů	významnost koeficientů
c_F	304	<i>velmi výrazná</i>
n_F	0,5448	<i>velmi výrazná</i>
y_F	0,0342	<i>výrazná</i>
významnost funkce		<i>velmi výrazná</i>
koeficient determinace: 0,93 → 93 % naznačuje <i>velmi silnou závislost</i>		
IN2004 $f_Z = 3 - 6$ mm $v_C = 270$ m/min $a_p = 0,02$ mm		

Tab. P5-4 Výsledky vyrovnávání závislostí a statistické analýzy při konstantní řezné rychlosti v_C ; **IN2004**

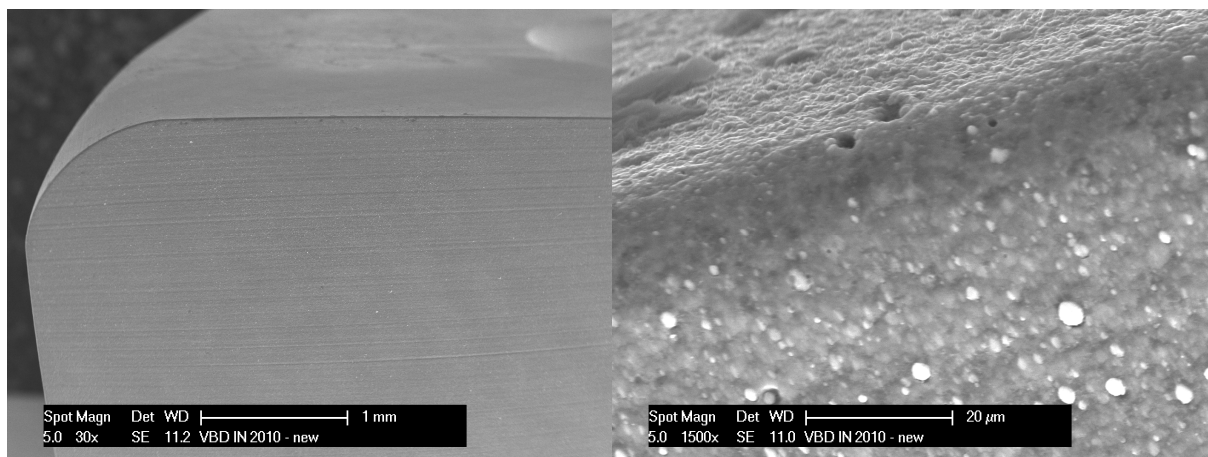
P-5.5 IN2010- experiment



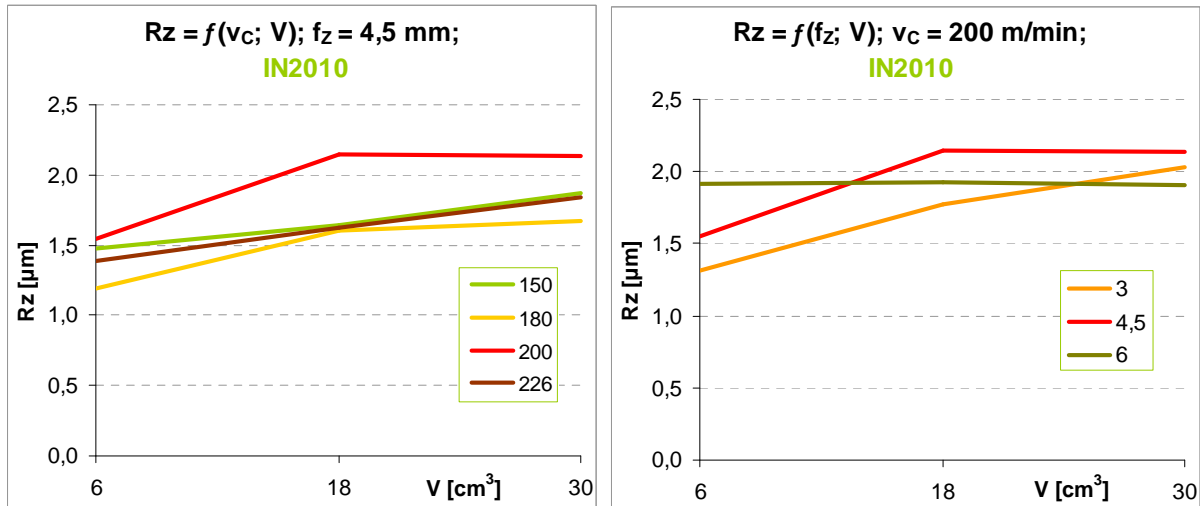
Tab. P5-5 Opatření VBD v závislosti na řezné rychlosti v_C ; stav po obrobení $V = 30\text{cm}^3$; **IN2010**



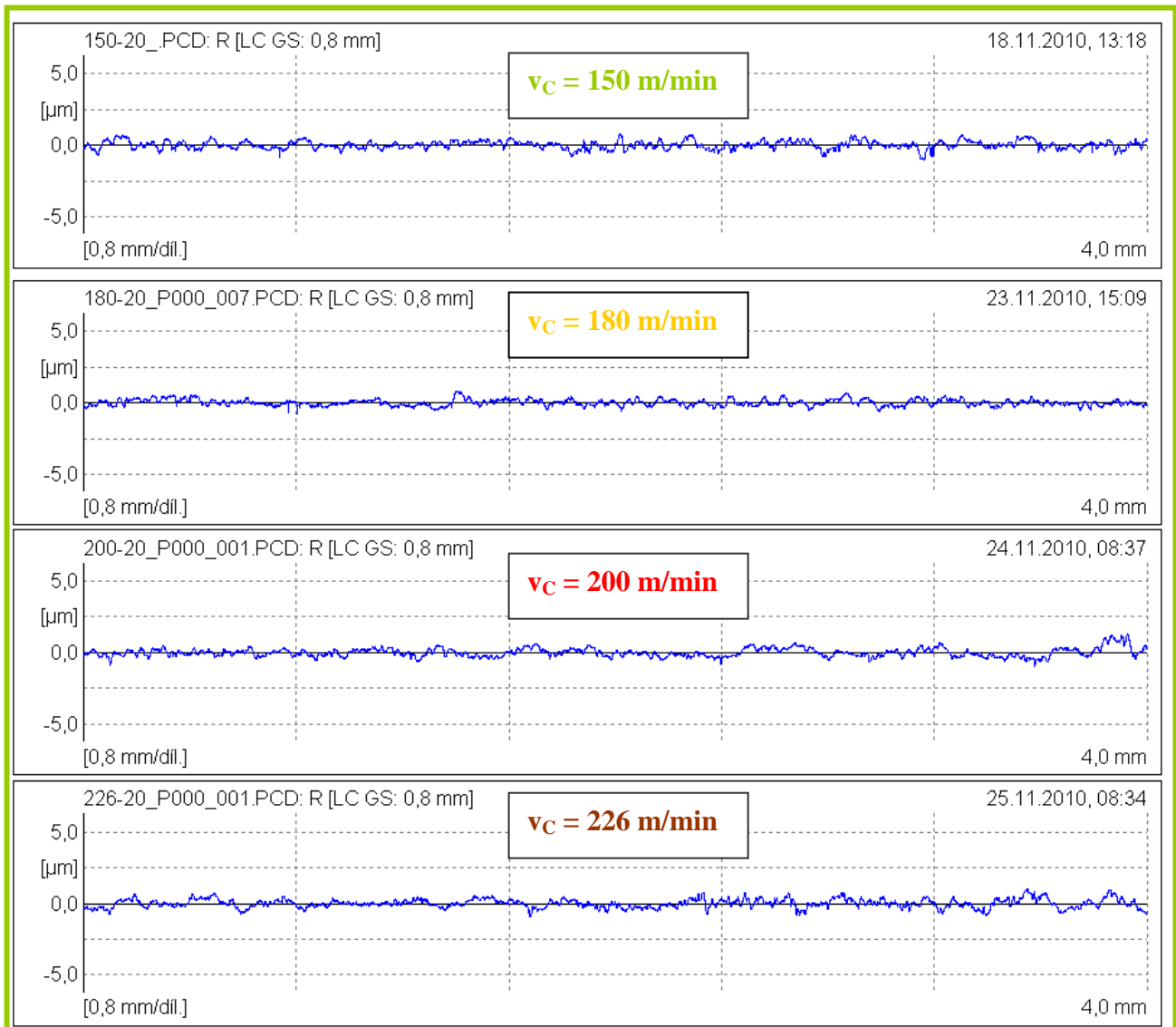
Tab. P5-6 Opatření VBD v závislosti na posuvu f_z ; stav po obrobení $V = 30 \text{ cm}^3$; IN2010



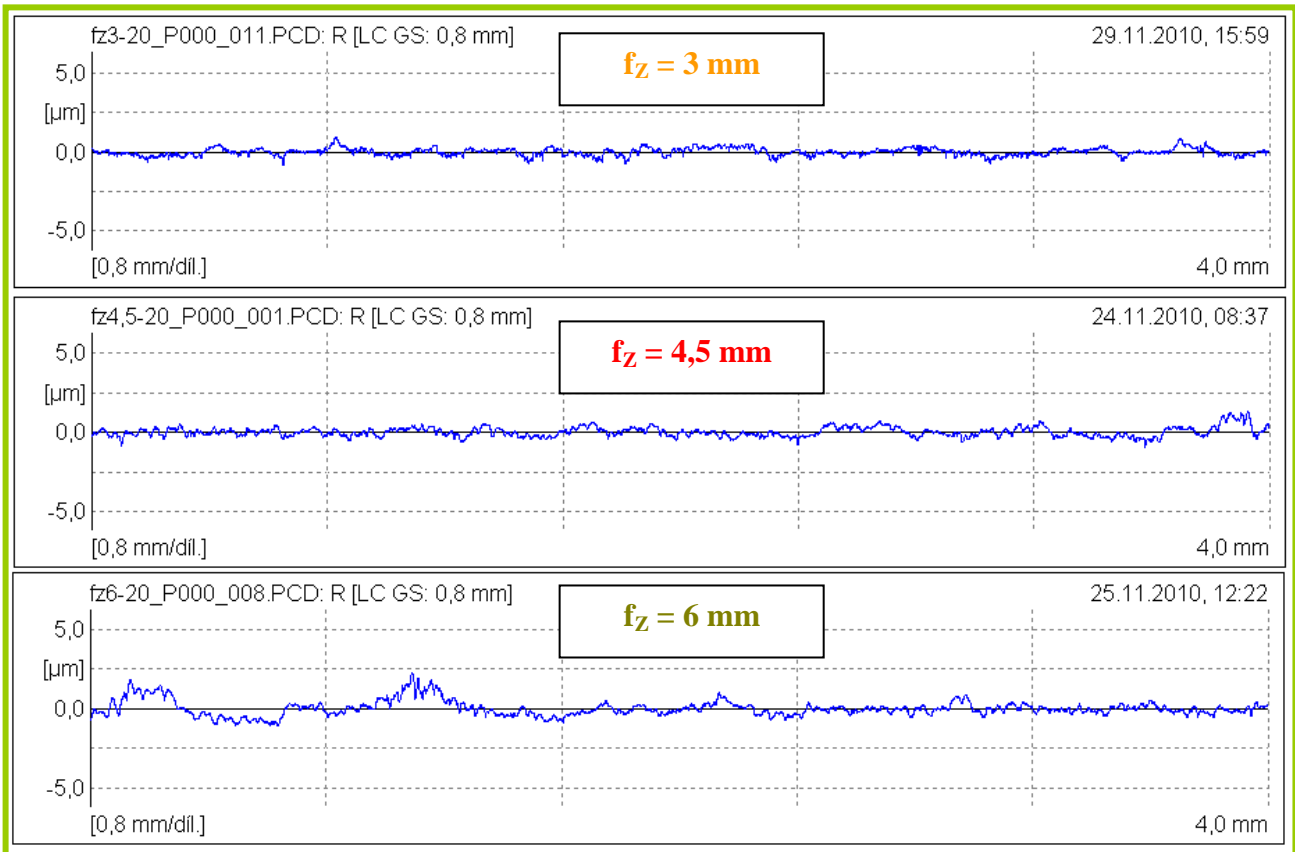
Obr. P5-13 Snímek špičky VBD (vlevo) a detail ostří (vpravo) před obráběním; IN2010



Obr. P5-14 Závislost drsnosti obroběného povrchu na objemu odebraného materiálu při změně řezné rychlosti v_c (vlevo) a změně posuvu f_z (vpravo); IN2010



Obr. P5-15 Porovnání profilů obroběného povrchu v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti v_c ; $f_z = 4,5 \text{ mm}; V = 6 \text{ cm}^3; \text{IN2010}$



Obr. P5-16 Porovnání profilů obrobeného povrchu v závislosti na zvyšujícím se posuvu f_z ; $v_C = 200$ m/min; $V = 6$ cm³; **IN2010**

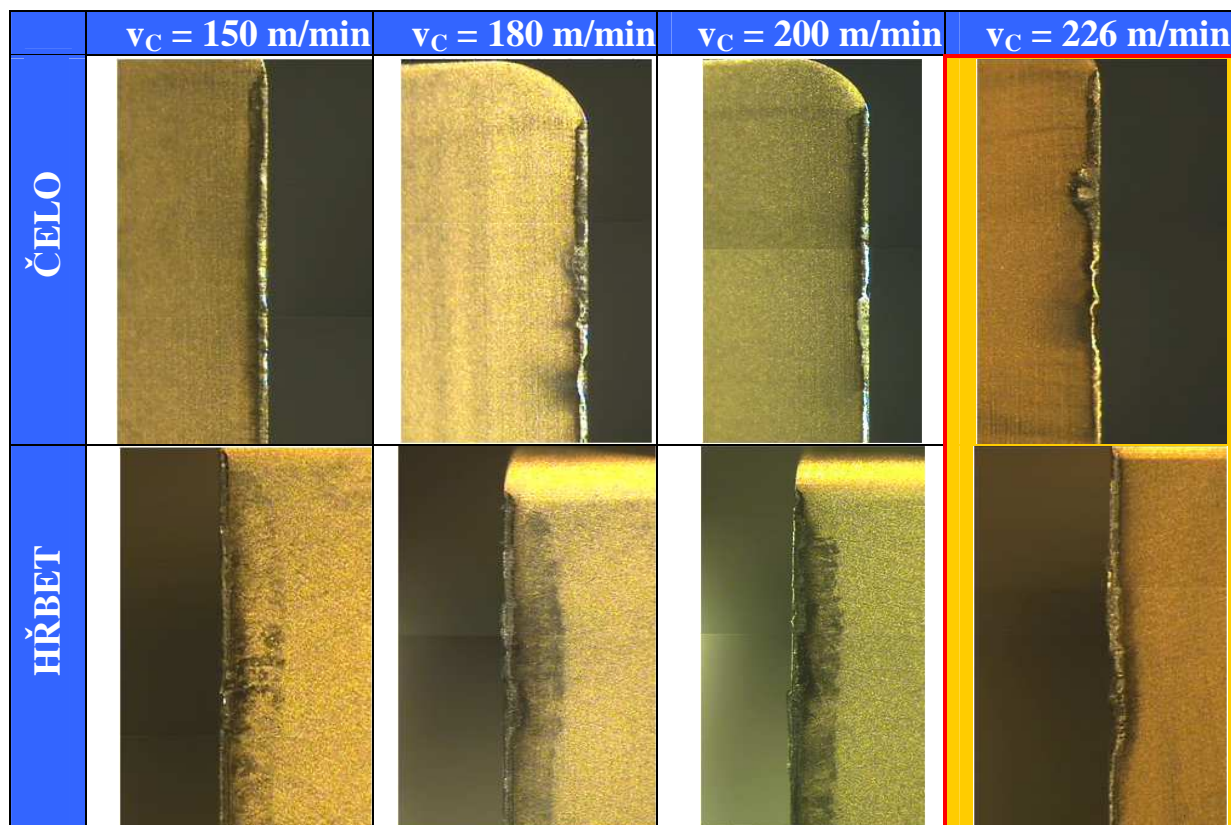
$F_{IN2010} = 99 \cdot v_C^{0,3252} \cdot V^{0,0449} [N]$			oblast pracovních podmínek IN2010 $f_z = 4,5$ mm $v_C = 150 - 226$ m/min $a_p = 0,02$ mm
F – koeficienty funkce a jejich významnost			
konstanta; exponenty	hodnoty koeficientů	významnost koeficientů	
c_F	99	<i>velmi výrazná</i>	
n_F	0,3252	<i>výrazná</i>	
y_F	0,0449	<i>výrazná</i>	
významnost funkce		<i>velmi výrazná</i>	
koeficient determinace: 0,73 → 73 % naznačuje <i>silnou závislost</i>			

Tab. P5-7 Výsledky vyrovnávání závislostí a statistické analýzy při konstantním posuvu f_z ; **IN2010**

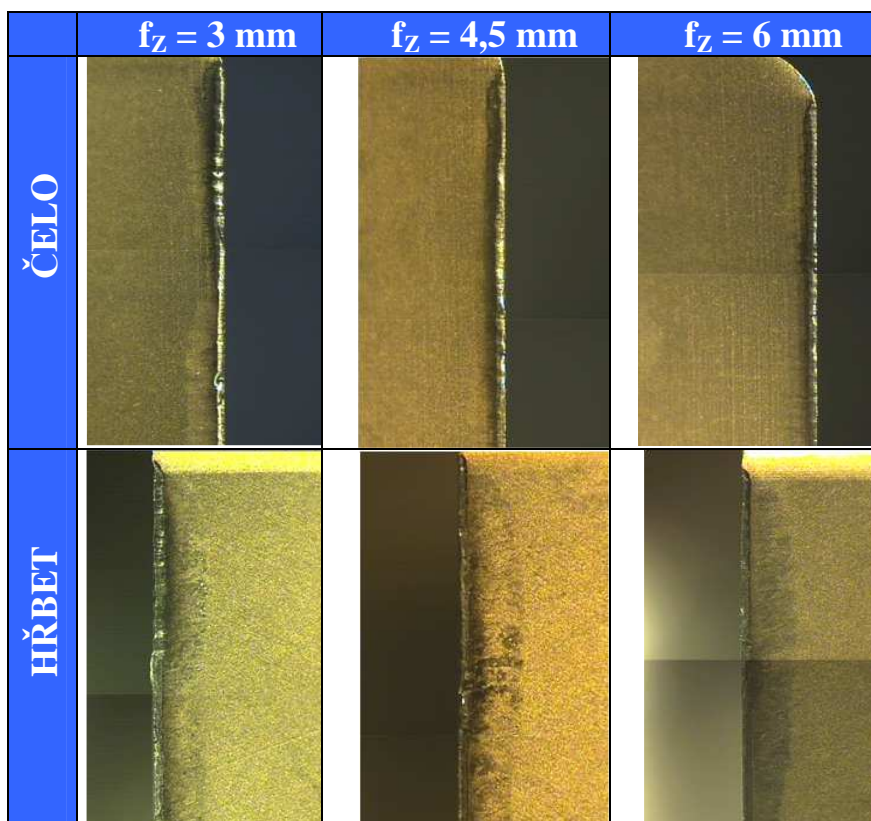
$F_{IN2010} = 277 \cdot f_z^{0,4952} \cdot V^{0,0539} [N]$		
F – koeficienty funkce a jejich významnost		oblast pracovních podmínek
konstanta; exponenty	hodnoty koeficientů	významnost koeficientů
c_F	277	<i>velmi výrazná</i>
n_F	0,4952	<i>velmi výrazná</i>
y_F	0,0539	<i>výrazná</i>
významnost funkce		<i>velmi výrazná</i>
koeficient determinace: 0,97 → 97 % naznačuje <i>velmi silnou závislost</i>		
IN2010 $f_z = 3 - 6$ mm $v_C = 200$ m/min $a_p = 0,02$ mm		

Tab. P5-8 Výsledky vyrovnávání závislostí a statistické analýzy při konstantní řezné rychlosti v_C ; **IN2010**

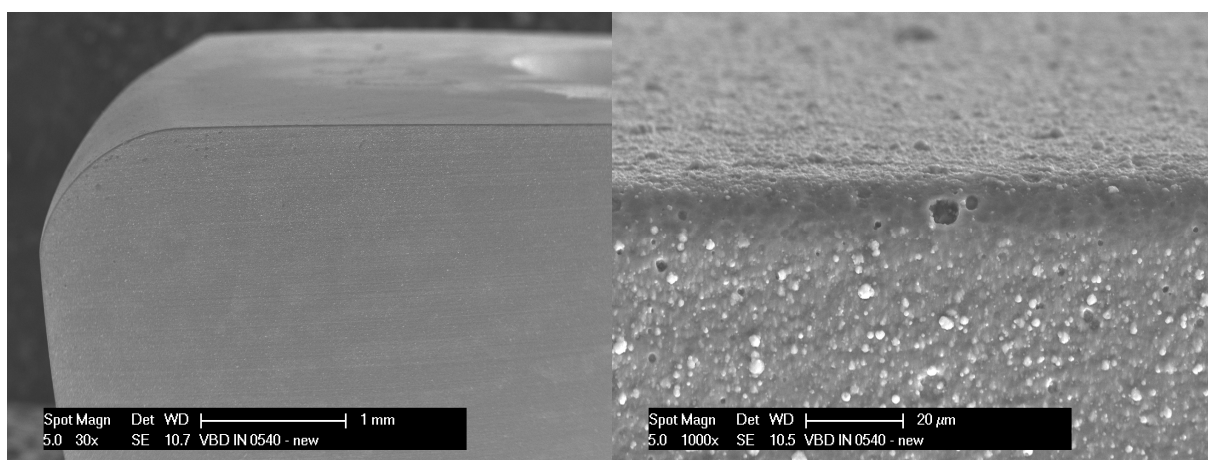
P-5.6 IN0540 - experiment



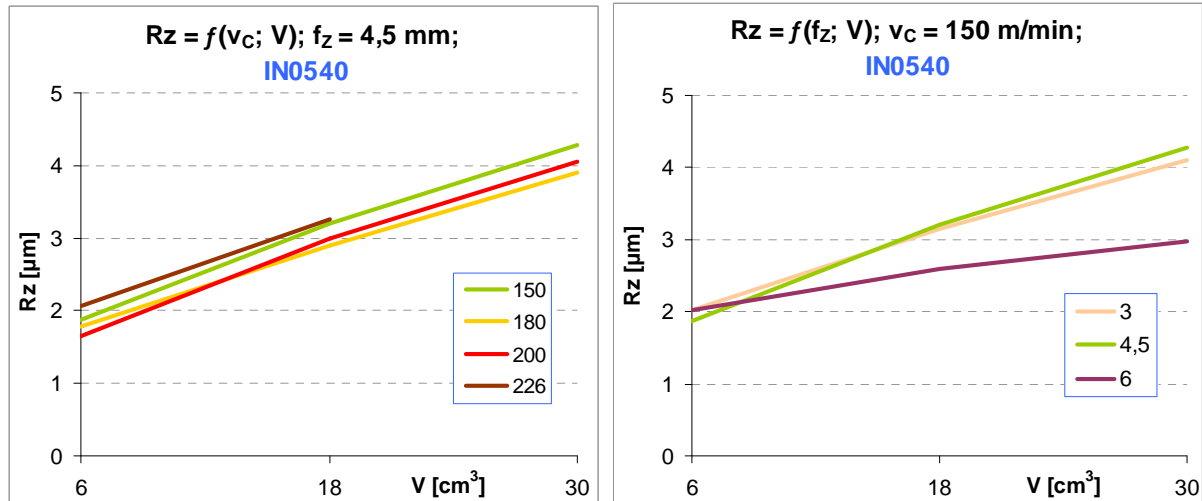
Tab. P5-9 Opotřebení VBD v závislosti na řezné rychlosti v_C ; stav po obrobení $V = 30\text{cm}^3$
(v případě $v_C = 226$ m/min je $V = 18\text{cm}^3$); **IN0540**



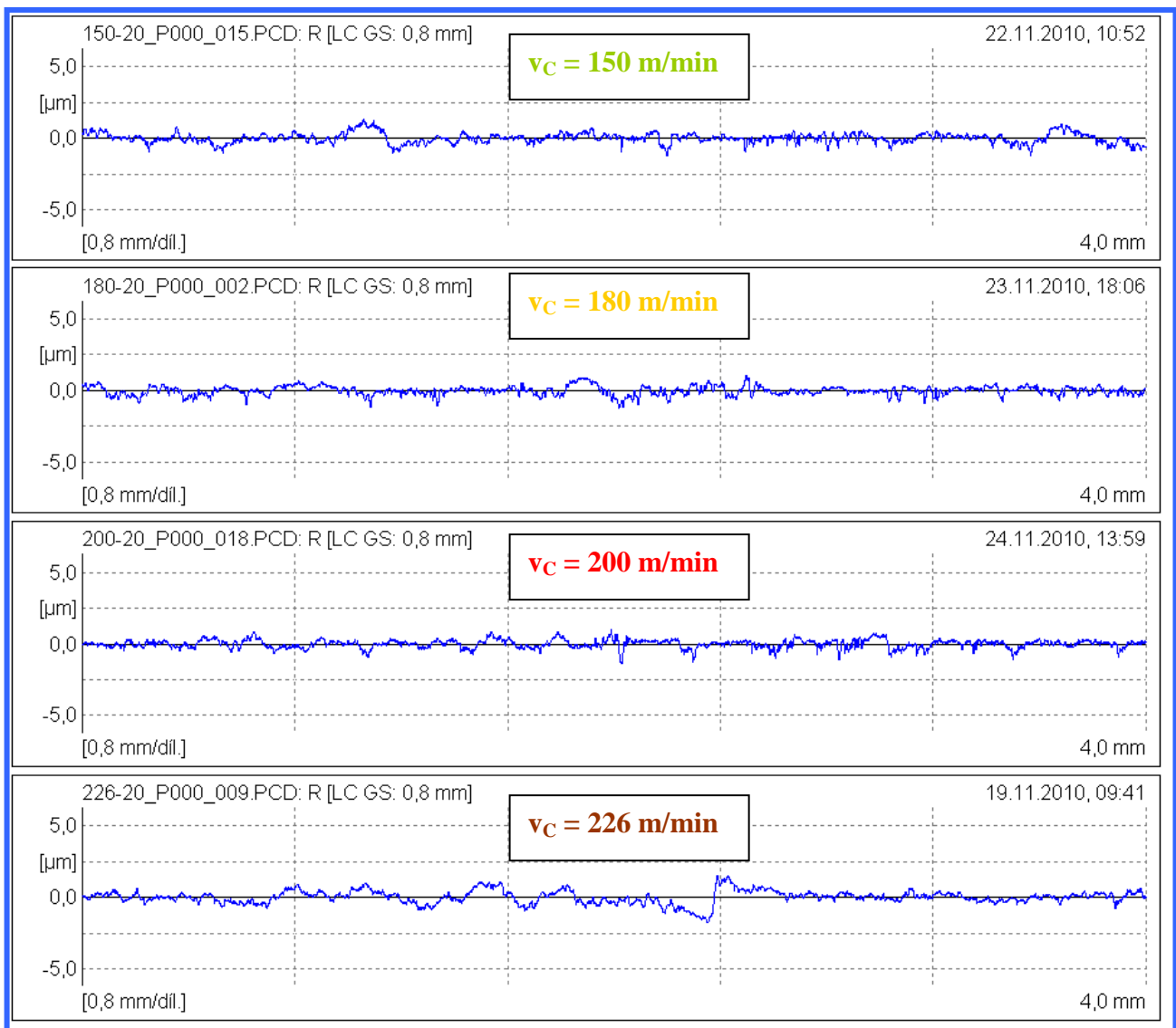
Tab. P5-10 Opatření VBD v závislosti na posuvu f_z ; stav po obrobení $V = 30 \text{ cm}^3$; IN0540



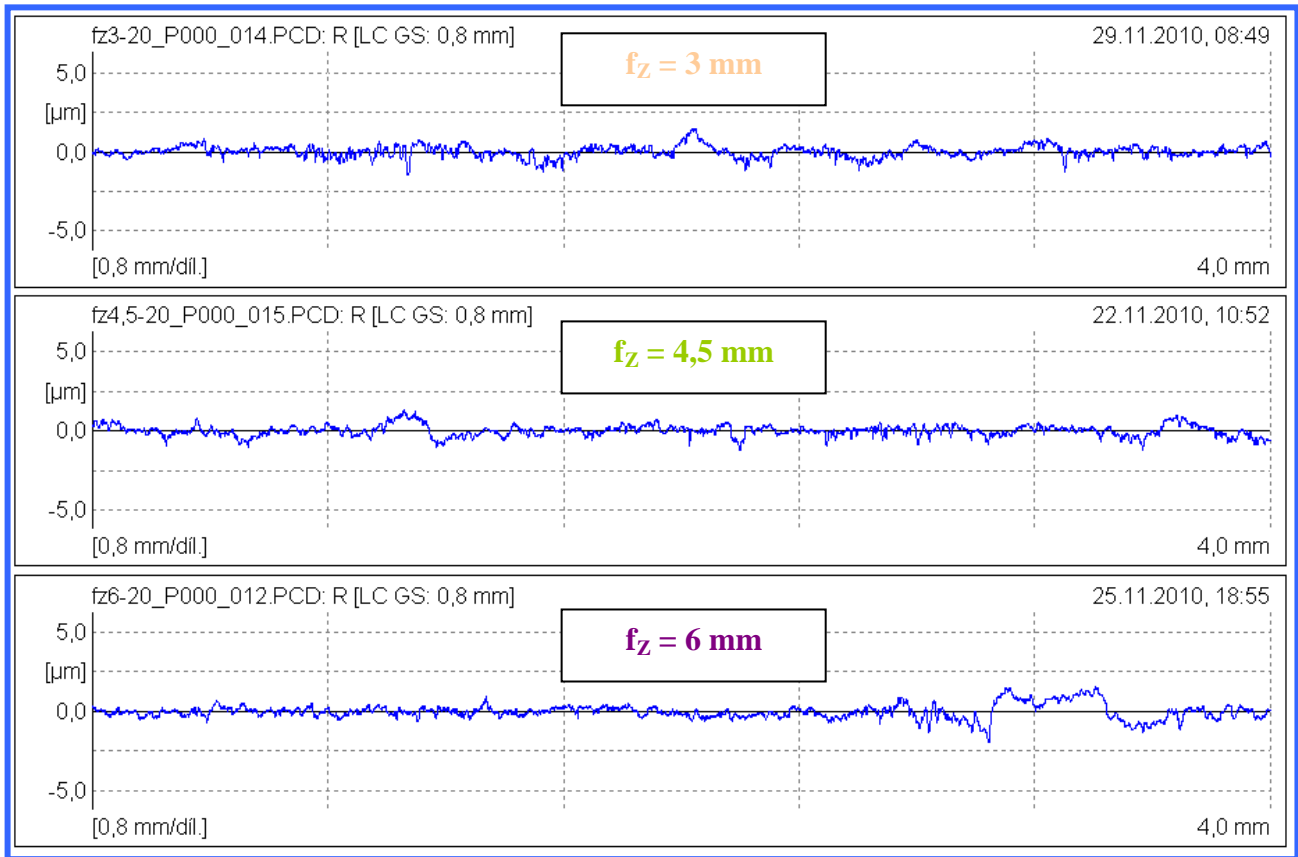
Obr. P5-17 Snímek špičky VBD (vlevo) a detail ostří (vpravo) před obráběním; IN0540



Obr. P5-18 Závislost drsnosti obroběného povrchu na objemu odebraného materiálu při změně řezné rychlosti v_c (vlevo) a změně posuvu f_z (vpravo); IN0540



Obr. P5-19 Porovnání profilů obroběného povrchu v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti v_c ; $f_z = 4,5 \text{ mm}; V = 6 \text{ cm}^3; \text{IN0540}$



Obr. P5-20 Porovnání profilů obrobeného povrchu v závislosti na zvyšujícím se posuvu fz ; vC = 150 m/min; V = 6 cm3; IN0540

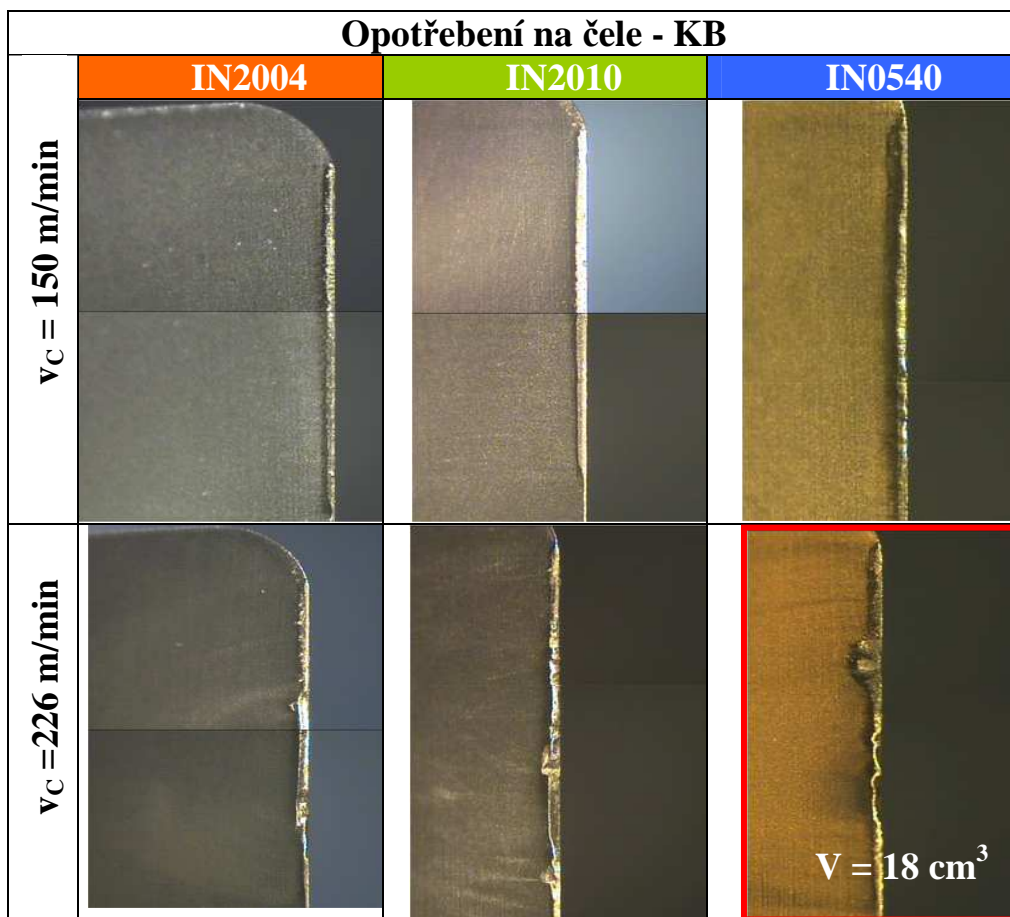
$F_{IN0540} = 6 \cdot v_C^{0,8622} \cdot V^{0,0743} [N]$			oblast pracovních podmínek
F – koeficienty funkce a jejich významnost			
konstanta; exponenty	hodnoty koeficientů	významnost koeficientů	IN0540 fz = 4,5 mm vC = 150 - 226 m/min ap = 0,02 mm
cF	6	výrazná	
nF	0,8622	výrazná	
yF	0,0743	výrazná	
významnost funkce		velmi výrazná	
koeficient determinace: 0,83 → 83 % naznačuje silnou závislost			

Tab. P5-11 Výsledky vyrovnávání závislostí a statistické analýzy při konstantním posuvu fz; IN0540

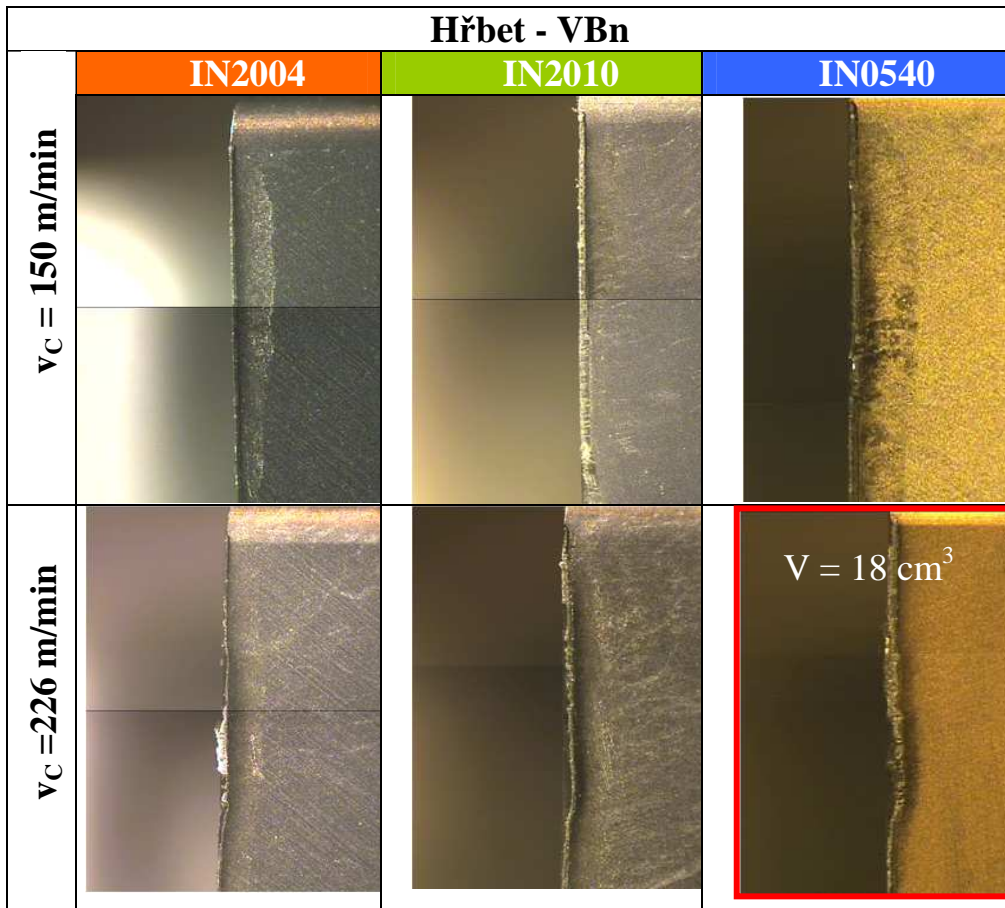
$F_{IN0540} = 350 \cdot f_Z^{0,4903} \cdot V^{-0,0505} [N]$		
F – koeficienty funkce a jejich významnost		oblast pracovních podmínek
konstanta; exponenty	hodnoty koeficientů	významnost koeficientů
c_F	350	<i>velmi výrazná</i>
n_F	0,4903	<i>velmi výrazná</i>
y_F	0,0505	<i>výrazná</i>
významnost funkce		<i>velmi výrazná</i>
koeficient determinace: 0,99 → 99 % naznačuje <i>velmi silnou závislost</i>		
<p>IN0540 $f_Z = 3 - 6$ mm $v_C = 150$ m/min $a_p = 0,02$ mm</p>		

Tab. P5-12 Výsledky vyrovnávání závislostí a statistické analýzy při konstantní řezné rychlosti v_C pro IN0540

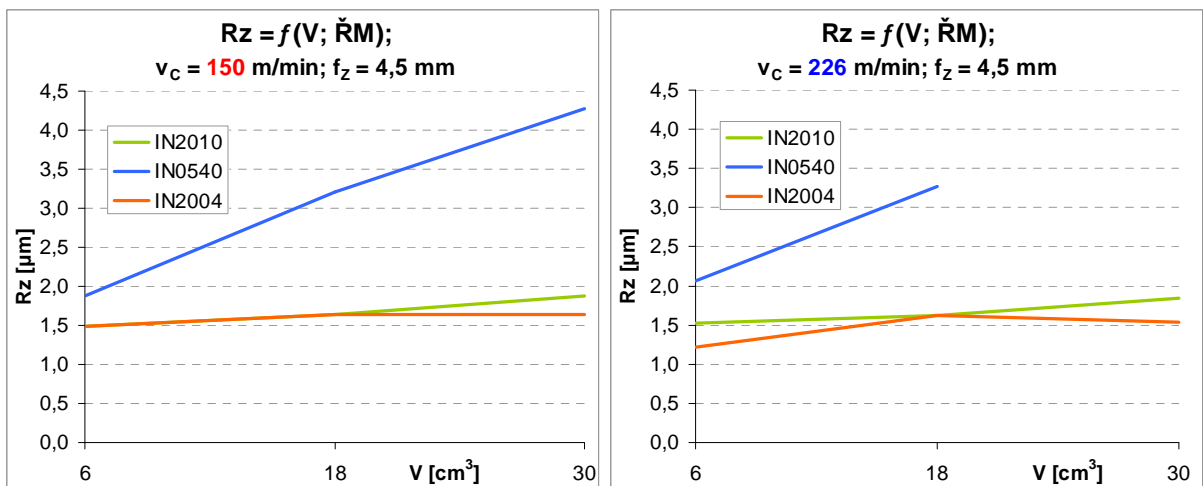
P-5.7 Celkové porovnání - experiment



Tab. P5-13 Porovnání opotřebení na čele pro jednotlivé typy VBD; stav po obrobení $V = 30\text{cm}^3$ (v případě IN0540 a $v_C = 226$ m/min je $V = 18\text{cm}^3$); $f_Z = 4,5$ mm



Tab. P5-14 Porovnání opotřebení na čele pro jednotlivé typy VBD; stav po obrobení $V = 30\text{cm}^3$ (v případě IN0540 a $v_C = 226$ m/min je $V = 18\text{cm}^3$); $f_Z = 4,5$ mm



Obr. P5-21 Porovnání závislosti drsnosti obroběného povrchu R_z na objemu odebraného materiálu V pro jednotlivé karbidy; $v_C = 150$ m/min (vlevo) a $v_C = 226$ m/min (vpravo); $f_Z = 4,5$ mm