



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

VYSOKORYCHLOSTNÍ SOUSTRUŽENÍ LOŽISEK Z MATERIÁLU 100CR6

HIGH-SPEED MACHINING OF BEARINGS FROM MATERIAL 100CR6

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Tropp

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavel Tropp

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

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Vysokorychlostní obrábění ložisek z materiálu 100Cr6

v anglickém jazyce:

High-speed Machining of Bearings from Material 100Cr6

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Popis, rozbor a charakteristika technologie HSC
3. Analýza stávajícího stavu obrábění ložisek z hlediska technologie třískového obrábění
4. Návrh inovace výrobního procesu – zefektivnění stávajícího stavu
5. Diskuse
6. Závěr

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce bude návrh na zefektivnění procesu obrábění ložisek. V práci bude provedena analýza stávajícího stavu obrábění ložisek z hlediska technologie třískového obrábění a navrhnutá inovace, která bude zohledňovat zefektivnění stávajícího výrobního procesu. Součástí práce bude rovněž popis a rozbor jednotlivých výrobních pracovišť, včetně zařízení a nástrojů potřebných k obrábění ložisek. Práce bude ukončena diskusí a celkovým zhodnocením včetně adekvátnosti použitých metod při obrábění ložisek.

Seznam odborné literatury:

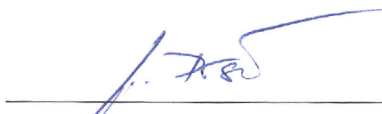
1. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. VASILKO, K. a kol. Valivé ložiská. 1. Vyd. Bratislava: Alfa, 1988.
3. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
4. AB SANDVIK COROMANT. Produktivní obrábění kovů. Sandvik Coromant, technické vyd. Švédsko: CMSE, 1997. 300 s. S-811 81 Sandviken, Švédsko.
5. KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2002. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 20.11.2014





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá tématem vysokorychlostního soustružení materiálu 100Cr6. Cílem je navrhnout a experimentálně ověřit inovaci výrobního procesu pro zvolenou součást. Práce obsahuje teoretické základy vysokorychlostního obrábění, analýzu stávajícího stavu výrobního procesu, návrh inovace a experimentální ověření. Na závěr jsou pak vyhodnoceny parametry obrobených ploch zkušebních vzorků.

Klíčová slova

HSC, tvrdé materiály, 100Cr6, vysokorychlostní obrábění, soustružení, řezné podmínky, technologie obrábění

ABSTRACT

This Master's thesis deals with the issue of high-speed turning of the 100Cr6 material. The aim is to identify and experimentally validate an innovative production process for a particular component. The thesis includes theoretical basis of high-speed machining, analysis of the current state of the manufacturing process, innovation design and experimental verification. At the end of the thesis, parameters of the machined surfaces of specimens are evaluated.

Key words

HSC, hard materials, 100Cr6, high-speed machining, turning, cutting conditions, machining technology

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TROPP, Pavel. *Vysokorychlostní soustružení ložisek z oceli 100Cr6*. Brno 2014.

Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 92 s. 6 příloh. doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vysokorychlostní obrábění ložisek z materiálu 100Cr6** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Pavel Tropp

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce,

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při návrhu rezných podmínek a následném vyhodnocení experimentu, Ing. Marku Šmídovi, zaměstnanci firmy INA SKALICA spol. s r.o. za cenné připomínky a rady při vypracování analýzy stávajícího stavu obrábění ložisek ve firmě, panu Jiřímu Čechovi, za realizaci experimentu v podmínkách školní dílny FSI VUT v Brně, Ústavu strojírenské technologie, doc. Ing. Josefu Chladilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vyhodnocování experimentu.

Děkuji společnosti METAL treatment s.r.o. za rychlé provedení tepelného zpracování testovaných vzorků.

Děkuji firmě ZKL Brno, a. s. za umožnění práce na přístroji Rollscan 300 pro vyhodnocení Barkhausenova šumu.

Děkuji firmě Intemac Solutions, s.r.o., Kuřim za technickou podporu.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině a blízkým, kteří mi umožnili zpracovat tuto práci a podporovali mě jak morálně, tak i finančně.

OBSAH

ABSTRAKT.....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ.....	11
1.1 Historie vysokorychlostního obrábění	11
1.2 Základní charakteristiky vysokorychlostního obrábění	12
1.3 Tvrdé obrábění	14
1.4 Mechanismus tvorby třísky	16
1.5 Porovnání řezných procesů při HSC a konvenčním obrábění.....	18
1.6 Tepelná bilance při HSC	19
1.7 Vliv řezných podmínek na proces HSC obrábění	22
1.8 Řezné nástroje pro HSC	25
1.9 Obráběcí stroje pro HSC	25
1.10 Řídicí systémy pro HSC	26
1.11 Výhody a nevýhody aplikace vysokorychlostního obrábění.....	26
1.12 Bezpečnost práce při HSC.....	27
2 ANALÝZA STÁVAJÍCÍHO STAVU OBRÁBĚNÍ LOŽISEK Z HLEDISKA TECHNOLOGIE TRÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ.....	28
2.1 Materiál 100Cr6	29
2.2 Používané stroje	30
2.3 Držáky nástrojů s VBD	35
2.4 Nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami	36
2.5 Vyměnitelné břitové destičky.....	36
2.6 Vzorová součást	36
3 NÁVRH INOVACE VÝROBNÍHO PROCESU.....	41
3.1 Příprava vzorků	41
3.2 Návrh experimentu.....	45
3.2.1 Teoretická drsnost povrchu	45
3.2.2 Nástroje pro experiment	47
3.2.3 Využitý stroj pro experiment.....	48
3.2.4 Řezné podmínky pro provedení experimentu	49

3.3	Realizace obrábění	50
3.4	Vyhodnocení naměřených hodnot.....	51
3.5	Vyhodnocení naměřených hodnot Barkhausenova šumu	66
3.6	Vyhodnocení nahrazeného vzorku 32	68
3.7	Vyhodnocení opotřebení vyměnitelných břitových destiček.....	68
4	DISKUZE.....	70
4.1	Návrh dalšího testování vzorků.....	71
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78
	SEZNAM PŘÍLOH.....	80

ÚVOD

Technologie vysokorychlostního obrábění, ve zkratce HSC, se označuje za relativně mladou technologii, přesto je známa již delší dobu. První pokusy byly prováděny již na počátku dvacátých let minulého století a poprvé byla zkratka HSC (High Speed Cutting) definována v roce 1931 Carlem Salomonem [7].

Jako jedna ze základních definic pro vysokorychlostní obrábění se uvádí, že se jedná o obrábění, při kterém řezná rychlost dosahuje 5 až 10x vyšších hodnot než u konvenčních metod. Při těchto rychlostech hraje velkou roli šíření tepla, protože teplota v rovině řezu dosahuje téměř až hodnoty teploty tavení obráběného materiálu. Z toho důvodu jsou podmínky vysokorychlostního obrábění pro každý materiál jiné. Proto je také pojem HSC velmi relativní. [6, 12].

V praxi se ujal názor, že obrábění vysokými řeznými rychlostmi probíhá při řezné rychlosti 600 až 1800 m/min, vysokými superřeznými rychlostmi při 1800 až 18 000 m/min a obrábění ultrařeznými rychlostmi nad 18 000 m/min. V případě těžkoobrobitelných materiálů se dává přednost spíše označení výkonné obrábění [6, 12].

Jako jeden z hlavních cílů, při přechodu výroby na vysokorychlostní, je zvýšení produktivity. Zvýšení produktivity musí finančně překonat pořizovací a provozní náklady, které jsou pro vysokorychlostní obrábění značně vyšší než pro konvenční způsob. Jako další cíle se uvádí zlepšení kvality povrchu a zvýšení životnosti nástroje [9].

Firma INA SKALICA spol. s r.o. obr. 1, pro kterou je situován návrh technologie na vysokorychlostní obrábění kroužků ložisek, je výrobním závodem celosvětové skupiny SCHAEFFLER, který se skládá z podniků INA, FAG a LUK. Jedná se o německou nadnárodní společnost se závody prakticky po celém světě včetně Argentiny, USA, Číny, Indie... Celá skupina zaměstnává po celém světě 70 000 zaměstnanců a patří k nim přes 180 podniků. Majitel skupiny SCHAEFFLER je rodina Schaeffler, která založila v roce 1947 mateřskou firmu INA. Dnes je nadnárodní koncern SCHAEFFLER známý po celém světě [2, 26, 27].

Hlavní produkce skupiny SCHAEFFLER je výroba valivých ložisek, ve Skalici z velké většiny jehlových. Celosvětově skupina SCHAEFFLER uvádí, že jsou schopni vyrobit velikosti ložisek od průměru 2 mm jehličkového pouzdra až do vnějšího průměru 4250 mm pro velká valivá ložiska [2, 26, 27].



Obr. 1 Výrobní závod INA SKALICA spol. s r.o. [2].

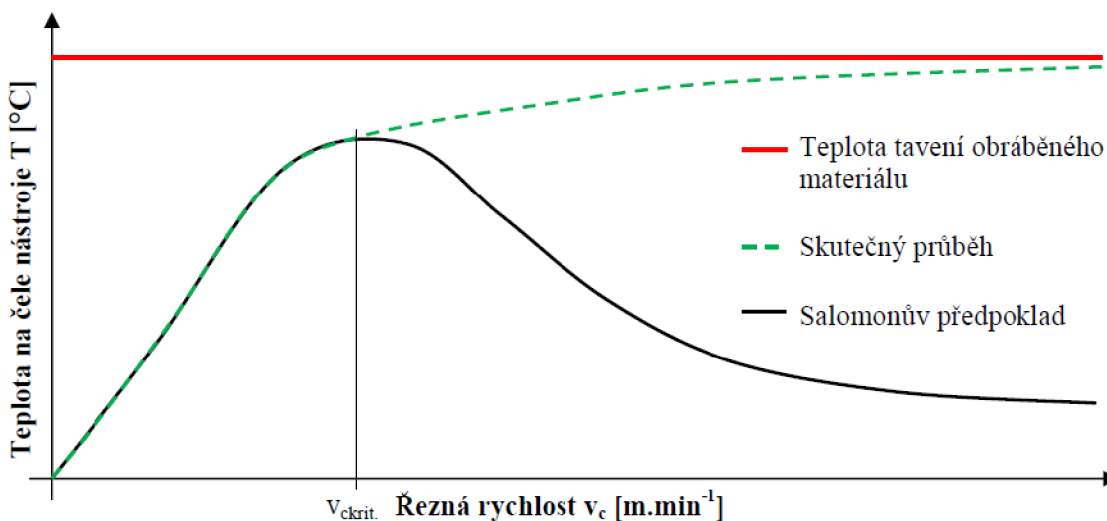
Firma INA SKALICA spol. s r.o. byla založena v roce 1991 a od tohoto roku se rozrůstala do dnešní podoby, kdy má téměř 5 000 zaměstnanců na rozloze přibližně 40 000 m². Podnik se člení na dvě linie: Automotive a industrie, které se dále člení na jednotlivé segmenty. Automotive se orientuje na výrobu součástek pro automobilový průmysl a industrie na ostatní strojírenskou výrobu. Segmentů se nachází v současnosti v podniku 13 a každý se segmentů se orientuje na jiné spektrum výroby. Mimo výrobní segmenty se v podniku nachází i různé podpůrné segmenty, jako jsou logistika, nástrojovna, ekonomické oddělení apod. [2, 26, 27].

1 VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ

1.1 Historie vysokorychlostního obrábění

První myšlenky ohledně obrábění za vysokých rychlostí se objevily již na počátku dvacátých let minulého století, ale první pokusy se nezdařily, jelikož s tehdejšími vybavením nebylo zatím možné dosáhnout dostatečných rychlostí. Jako první provedl úspěšné testování vysokorychlostního obrábění Carl Salomon, který v roce 1931 dosáhl odpovídajících řezných rychlostí při frézování hliníkové slitiny nástrojem o velkém průměru [3, 6].

Jeho první předpoklad spočíval v tom, že řezná teplota roste s rostoucí řeznou rychlostí a po překročení určitého maxima rapidně klesá. Pokles teploty si zdůvodňoval tím, že se primární deformace v oblasti tvoření třísky s řeznou rychlostí zmenšuje, protože stupeň plasticity materiálu je závislý na rychlosti deformace, tudíž se materiál se zvyšující řeznou rychlostí stává méně plastický. V pozdějších letech byl tento předpoklad vyvrácen a bylo prokázáno, že zpočátku rychlý nárůst teploty se zpomalí a střední teplota řezání se s rostoucí řeznou rychlostí asymptoticky blíží teplotě tavení obráběného materiálu [3, 6].



Obr. 1.1 Závislost teploty na čele nástroje na řezné rychlosti [3, 6, 9].

Na obrázku 1.1 je znázorněn obecný graf závislosti řezné rychlosti a hodnotě řezné teploty. Jak lze vidět, v bodu $v_{ckrit.}$ dochází k náhlé změně křivky, což je právě Salomonův předpoklad. V pozdější době však byl zjištěn jiný průběh, který je znázorněn čárkovaně. Teplota, přibližně v oblasti bodu $v_{ckrit.}$ spíše snižuje rychlost růstu hodnoty a při zvyšující se hodnotě řezné rychlosti se pozvolně blíží k teplotě tavení materiálu [3, 6, 7].

V některých výzkumných laboratořích později ověřovali teoretické závěry Salomona. Testoval se pokles řezné teploty po dosažení maxima. Prováděli se balistické zkoušky, kdy byl projektil vystřelen vůči ostří nástroje. Při těchto testech se dosahovalo řezné rychlosti

řádově 50 000 až 80 000 m.min⁻¹. Bohužel však tyto testy nebyly průkazné, i když sice potvrdily nižší úroveň řezných teplot, řezných sil a i změny podmínek pro tvorbu třísky, ale doba trvání záběru bříty nástroje s obrobkem (projektilem) byla v řádu milisekund, takže se jednalo o příliš odlišné řezné podmínky oproti běžnému obrábění [3, 6].

Další výzkumy problematiky se prováděly v 70. A 80. letech minulého století v rámci projektu DRAPA (Defense Advanced Project Agency), který financovalo USAAF. Testovalo se HCS obrábění pro obrábění speciálních materiálů jako např. titan nebo jiných slitin, ale i obrábění slitin hliníku [3].

V rámci Evropy pak byl zaznamenán nejvýznamnější rozvoj vysokorychlostního obrábění na německých technických univerzitách. Např. v roce 1980 se na technické univerzitě v Darmstadtu uvedl do provozu stroj pro technologii HSC, který využíval uložení vřetene v aktivních magnetických ložiscích [7].

1.2 Základní charakteristiky vysokorychlostního obrábění

Podstata vysokorychlostního obrábění především spočívá ve snižování strojních časů za současného zvýšení kvality povrchu a lepší přesnosti a to často u obrábění matematicky těžko definovatelných ploch. Toho HSC technologie dosahuje zvýšením řezné rychlosti v_c , ale také posuvové rychlosti v_f [4].

Zvýšení řezných rychlostí vede k nárůstu dalšího velmi důležitého činitele v celém procesu a tj. zvýšení teploty v místě řezu. Díky zvýšení teploty ubývá počet řezných složek a tím se snižuje celková hodnota řezných sil. V neposlední řadě také zvýšení řezné teploty při HSC má za následek paradoxně menší ohřev obrobku. Je to způsobeno změnami poměru tvorby třísky, kdy do třísky odchází většina tepla, které se nestihne přenést do obrobku, viz kapitola „tvorba třísky“ [4].

Podstatné pro průběh vysokorychlostního obrábění je vyloučení chlazení z procesu obrábění, hovoří se tedy o tzv. suchém obrábění nebo taky kvazi-suchém obrábění (polosuchém). Díky chladicí kapalině by bylo velmi obtížné dosáhnout vhodného režimu pro HSC. Chladicí kapalina má za účel odvádět teplo vzniklé během obrábění, ale vysoká řezná teplota je v tomto případě pozitivní faktor a pro správný průběh obrábění je nezbytná [3, 6].

Běžně se však používají technologie, kde se bez procesních kapalin nelze obejít, jako je vrtání nebo broušení (záporná geometrie bříty/zrna). Tam se využívá právě již zmiňovaná metoda kvazi-suchého obrábění, která ponechává určité silně zredukované množství procesních kapalin nebo mlhy pro mazání čela bříty nástroje a tím zajistí dostatečné promazání styku nástroje s obrobkem. Další nepříjemností je samotná tříska při obrábění, která je velmi horká. Tříska se při obrábění může shlukovat v dutinách obrobku nebo

přípravku a díky teplotě pak způsobovat jejich tepelnou deformaci, to má pak vliv na přesnost nebo kvalitu obrobených ploch. Pro podobné případy se pak využívá speciální chladičí zařízení [3, 6].

Tab. 1.1 Řezné rychlosti HSC pro různé materiály [5].

Materiál	Řezná rychlost [m.min⁻¹]
Ocel	800 až 1100
Slitiny Ti	150 až 1000
Slitiny Ni	160 až 280
Litina	900 až 1600
Slitina Al	3000 až 6000
Plasty spevněné vlákny	2800 až 8000
Bronz, mosaz	1100 až 3000

Tab. 1.2 Řezné rychlosti HSC pro různé metody obrábění [5].

Metoda obrábění	Řezná rychlost [m.min⁻¹]
Soustružení	800 až 8000
Vrtání	100 až 1100
Frézování	560 až 6000
Frézování závitů	120 až 400
Protahování	12 až 70
Vystružování	10 až 250
Řezání	70 až 200
Broušení	6000 až 9500
Broušení	100 až 160 m.s ⁻¹

Samotný název této technologie bývá zavádějící. Pokud se provede hlubší analýza problému, nelze říct, že se konvenční obrábění mění na vysokorychlostní při zvýšení řezné rychlosti bez ohledu na jiné řezné podmínky. Těmito podmínkami je myšleno jak způsob obrábění, tak také obráběný materiál, který je právě nejdůležitější pro volbu řezné rychlosti [5, 6].

Z tab. 1.1 a 1.2 je patrné, že vysokorychlostní obrábění má své specifické hodnoty pro řeznou rychlost rozděleny zvlášť pro každý materiál i pro každou obráběcí technologii. To je důvod velmi složitého určení, kdy se jedná o obrábění vysokorychlostní a kdy ne. Často se pak v praxi stává, že je obrábění označeno za vysokorychlostní, ale řezné podmínky tomu neodpovídají [4, 5, 6].

HSC technologie zahrnuje, mimo vlastního vysokorychlostního obrábění, také technologii tvrdého obrábění. Tvrdé obrábění zajišťuje obrábění např. kalených ocelí nebo jiných velmi tvrdých materiálů nástroji s definovaným tvarem řezné hrany. Díky HSC je možno nahradit ekonomicky, ekologicky a energeticky nevýhodnou metodu technologie broušení, které během obrábění má i nepříznivý vliv na obráběný povrch [4, 6].

Rychlostní frézování prosazuje téměř výhradně frézování sousledné. Je to díky jeho charakteristické menší náchylnosti na trhavé pohyby oproti nesouslednému. Je daleko výhodnější z hlediska silových poměrů. Řezná síla působí směrem do upínače, není proto nutné vymezit tak velkou upínací sílu jako u nesousledného [4, 6].

Vedle zkratky HSC jsou i další běžně využívané zkratky jako je HSM, HPC nebo HPM. HSM (High Speed Machining) má prakticky stejný význam jako HSC, přesto se však v některých literaturách mohou vyskytovat rozdíly. HPM a HPC (High Performance Machining/Cutting) je obrábění při vysokých výkonech, v jiných literaturách nazývané také vysoko-výkonnostní obrábění. I tyto zkratky bývají v literaturách zaměňovány s HSC, ale to z hlediska významu jednotlivých zkratek není správné označení [4, 6].

Hlavní rozdíl mezi HSC a HPC spočívá v kladení důrazu na řezné podmínky. Obrábění HSC ve své podstatě klade největší důraz na řeznou rychlost, kdežto HPC klade důraz na řezný výkon a množství odebraného materiálu. U HPC je prvotním hlediskem kombinace celkových ekonomicko-kvalitativních kritérií. Tedy by se dalo usoudit, že HPC je nadřazeno HSC, jelikož HSC se prvotně zaměřuje na samotný obráběcí proces. V literaturách se však pro vysokorychlostní technologie uchytilo označení HSC jako obecné [6].

Vysokorychlostní obrábění s sebou přináší celkově odlišný pohled na celý proces obrábění. Využívané nástroje a stroje jsou značně dražší než stroje a nástroje pro konvenční obrábění a i přes svou vyšší cenu jsou obráběcí stroje pro HSC více namáhané, z čehož vyplývá, že mají kratší životnost a během obrábění se spotřebovává větší množství nástrojů. Podstatné jsou i nároky na řídicí systémy, příprava výroby vyžaduje vyšší vospělost softwarů CAD/CAM, které musí mít nutné nástroje, a zároveň i zkušenější programátory [9].

1.3 Tvrdé obrábění

Pro obrábění materiálů s vysokou tvrdostí v minulosti nebylo možné využít jiné obráběcí metody než broušení. Jiné metody, respektive obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu je umožněno především díky pokroku v materiálech nástrojů. Především nástroje s kubického nitridu bóru, které umožňují obrábění tvrdých materiálů [6, 16].

Zpravidla se požaduje za tvrdé obrábění, když se obrábí materiály s tvrdostí přesahující 56 HRC nebo s pevností vyšší než $2000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$. Časté využití je u frézování forem a zápustek, které se před hrubováním kalí a je nutno odebrat přídavek na dokončení. Při tomto frézování se obrábí materiál s tvrdostí dosahující až 70 HRC [10, 16].

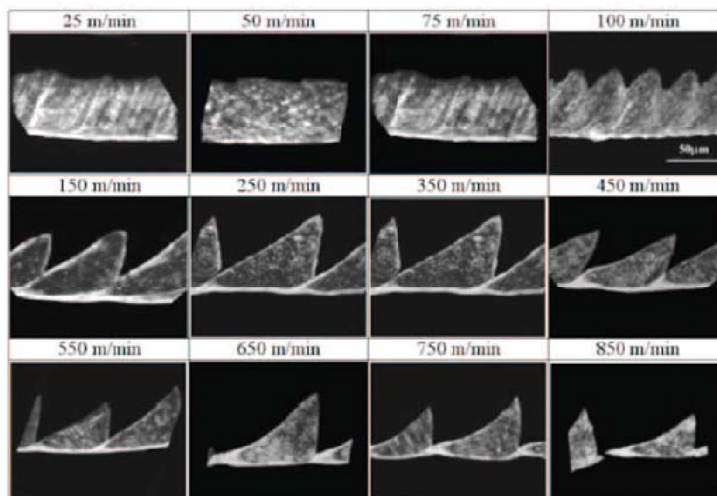
Pro tvrdé obrábění bývá nejvhodnější využít materiál zhotoven ze slinutých karbidů. Jedná se o materiál na bázi karbidu wolframu a kobaltu. Pro obrábění tvrdých materiálů jsou vhodné materiály s obsahem kobaltu menším než 10%. Klasické slinuté karbidy značeny

dle ISO P, M a K nejsou pro tvrdé materiály příliš vhodné. Dále se pak nástroj pro obrábění tvrdokovu povlakuje a to povlakem TiAlN, který má pracovní teplotu 800 až 1000 °C. Povlaky obecně u nástrojů snižují tření a zvyšují tvrdost povrchu nástroje, která je u tvrdého obrábění významná [10, 16].

Z pohledu geometrie ne každý celotvrdokovový nástroj je vhodný pro tvrdé obrábění. Jako základní požadavky na nástroj je pro tvrdé obrábění přesnost v řádu mikrometrů a stopka u fréz vyráběná v toleranci h5. Oproti nástrojům pro měkké obrábění jsou i rozdílné úhly čela, hřbetu a ostří. Hloubka záběru ostří se liší dle tvrdosti obráběného materiálu, ale maximálně činí $a_p=0,2$ mm. [10, 16]

Samotné obrábění se pak realizuje technologií HSC. Jelikož je HSC založeno na interakci rychlosti přetváření a teploty materiálu, která dosahuje až teploty tavení obráběného materiálu a zpravidla je vyšší než přípustná teplota povlaků, musí se dodržovat pravidla nazvaná jako „keep the tool cold“. Jako první je nutné nastavit kontaktní úhel k obrobku na co nejmenší možnou hodnotu a dále pak udržovat řeznou rychlost na takové hodnotě, aby se ostří nástroje zahřálo maximálně na dovolenou teplotu povlaku. Třísky vznikající při obrábění a s nimi vznikající tepelnou energii je nutno co nejrychleji odstranit. Ideální způsob je tlakem vzduchu. Zdaleka nejhorší možností je v tomto případě použít chladicí emulzi. Stačí pouhé minimum kapaliny k tomu, aby způsobila na nástroji teplotní šok a vznik mikrotrhlin [10, 16].

V [11] je popis experimentálně odzkoušeného frézování tvrdého materiálu, konkrétně formy z materiálu 19 556. Tepelně zpracováním se provedlo zakalení na tvrdost 56HRC a následně je proveden experimentální obrábění. Během experimentu je použita frézovací hlava Sandvik coromat, Coromill 200, břitové destičky povlakované SK GC 4020 a pracovní stroj byl použit MCV 750 A od firmy Kovořez Ústí o výkonu 16 kW a rozsahu otáček 20 až 13 000 min^{-1} . Během experimentu se obrábělo při různých řezných rychlostech od 25 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ až po 850 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Z experimentu pak vyplynulo, že k přechodu na HSC došlo při řezné rychlosti 450 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ z morfologického hlediska. Před touto hranicí roste zpevňování třísek a řezná síla, ale nad hranicí dochází k natavení třísky v řezné rovině a tříska se tvoří s výraznou článkovitostí. Po překonání hranice 850 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ se tříska mění na elementární, prudce klesá řezná síla a také součinitel pěchování třísky [9, 11, 16].

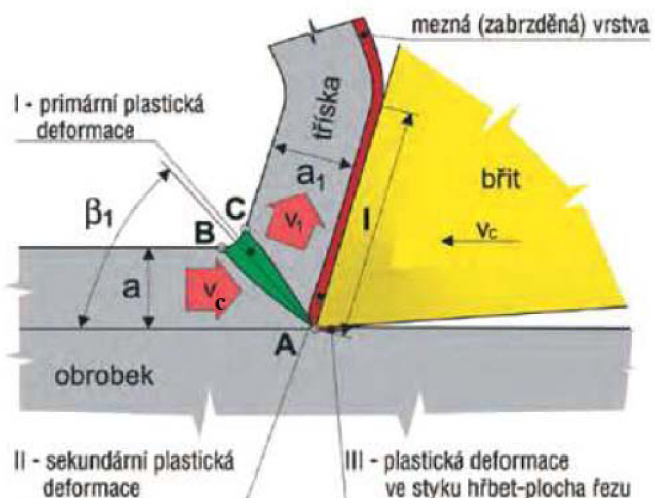


Obr. 1.2 Metalografické vzorky při tvrdém obrábění oceli 19 556, zakalené na 56HRC [11, 9].

1.4 Mechanismus tvorby třísky

Utváření třísky při řezání kovů patří mezi složité heterogenní, deformační a destruktivní procesy. Na proces řezání třísky se vyskytují v literaturách četné názory a pohledy. Nejbližší je však jistý Loladze, který tvorbu třísky definoval jako obtékání klínu řezného nástroje obráběným materiálem díky vyvolané plastické deformaci v rovině řezu [4, 6].

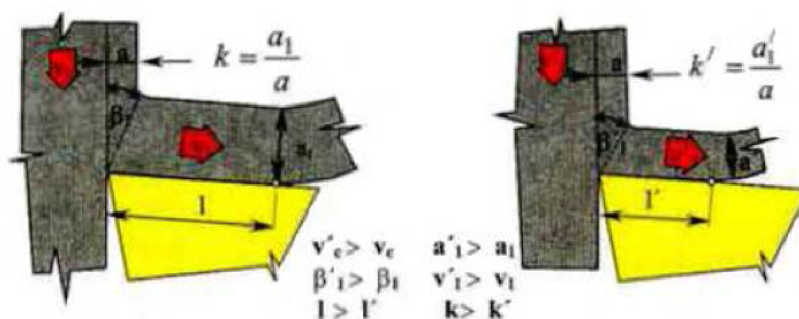
Během procesu tvorby a následného oddělení třísky prochází oddělovaný materiál stavy pružné napjatosti a plastické deformace, než dojde k jeho oddělení lomovým porušením. K přeměně materiálu v třísku dochází v oblasti známé jako kořen třísky. Tato oblast se dělí na další tři podoblasti, ve kterých dochází k významnějším plastickým deformacím. Oblast primární deformace, kde dochází k největší plastické deformaci, probíhá zde proces přeměny materiálu v třísku. Oblast sekundární plastické deformace je oblast charakteristická velkou plastickou deformací a velkým vlivem tření třísky po čele nástroje. A jako třetí je oblast terciální plastické deformace, která je má vliv na výsledný povrch součásti, jelikož je výsledkem existence poloměru ostří nástroje, díky kterému povrch nevzniká pouze obráběním, ale i procesy tváření [1, 9, 14].



Obr. 1.3 Mechanismus tvorby třísky [9, 14].

Během procesu se vyvozuje silový účinek mezi nástrojem a obráběným materiálem. Tento účinek lze charakterizovat jako působení normálové síly kolmo k rovině styku čela nástroje s třískou a sílu tření vyvozenou „obtékáním“ třísky po čele nástroje. Složením těchto sil se získá výsledný silový účinek, který má své působíště ve středu uvažované úsečky rozhraní styku třísky a nástroje. Výsledná síla vyvolává v obráběném materiálu reakci s obráceným znamínkem. Fyzikální podstata reakce tvoří deformační odpor materiálu [4, 6].

Z podstaty technologie vysokorychlostního obrábění vyplývá, že vytvořená tříska dosahuje velmi vysokých teplot, většinou téměř až teplot tavení. Z toho vyplývá, že při užití určitých řezných podmínek, se mění řada metalurgických, chemických i mechanických vlastností třísky. Tříska sníží svoji přitlačnou sílu na čelo nástroje, v případě kaleného materiálu dochází k odpevnění. Klesá třecí síla i celkový řezný odpor materiálu, zvětší se úhel smykové roviny, zmenší se průřez třísky, zvýší se rychlost odchodu třísky z kontaktní zóny a samozřejmě se i zvyšuje její teplota, v některých případech tříska doslova shoří [4, 6].



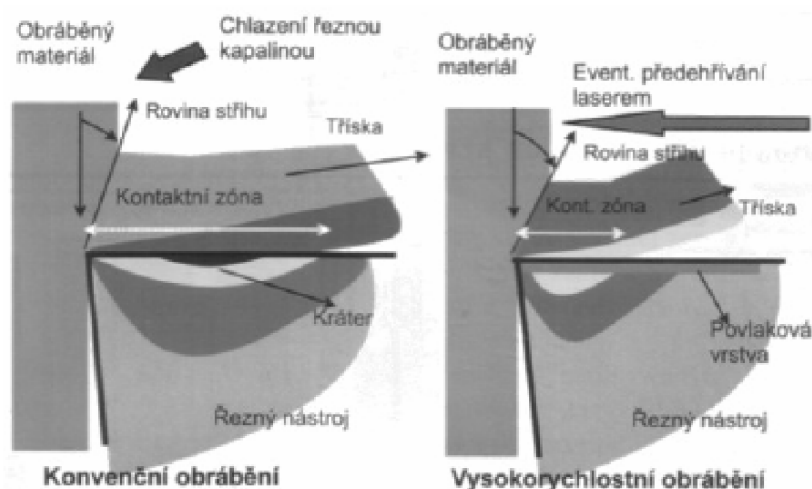
Obr. 1.4 Porovnání řezných faktorů pro konvenční a vysokorychlostní obrábění [6].

Na obr. 1.4 je porovnání rozdílných faktorů při tvorbě třísky pro konvenční obrábění vpravo a vysokorychlostní obrábění vlevo. Lze názorně vidět, že kontaktní plocha je u technologie HSC kratší a tloušťka třísky v návaznosti i průřez třísky je při stejném odebraném materiálu menší. Díky tomu se i zvyšuje hodnota úhlu smykové roviny. [6]

1.5 Porovnání řezných procesů při HSC a konvenčním obrábění

Jako obecné pravidlo pro obrábění platí, že aby probíhalo řezání materiálu, je nutné, aby si při dané obráběcí teplotě a řezných podmínkách řezný materiál zachoval vyšší stupeň tvrdosti než materiál obráběný. Jako hlavním rozdílem mezi konvenčním a vysokorychlostním obráběním je mechanismus tvorby třísky. Samotný průběh tvorby třísky je složitý a závisí na mnoha činitelích jak již napsáno výše [6].

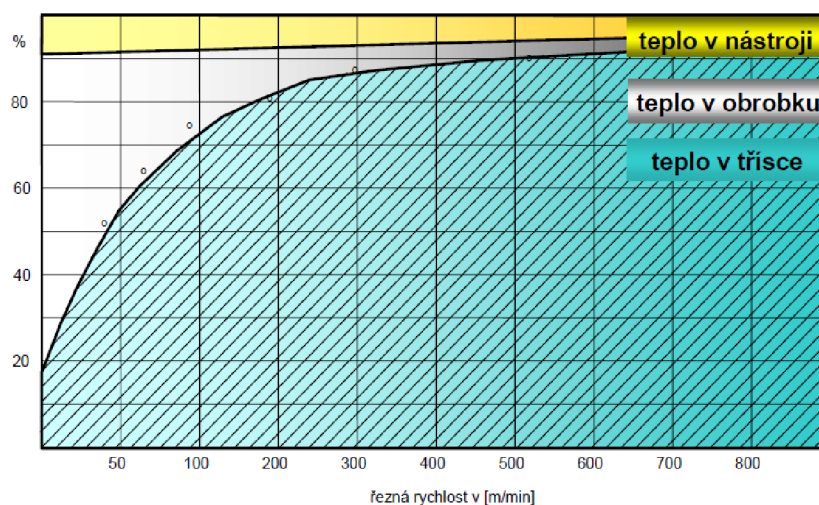
V průběhu konvenčního obrábění se odebraný materiál dostane přes oblast primární plastické deformace, kde dojde k jeho značné plastické deformaci a tím i k jeho zpevnění a zvýšení tvrdosti. Díky tomu klade materiál větší odpor při obrábění a v kombinaci s malým úhlem střížné roviny zapříčiňuje zvětšení tloušťky odebírané třísky. Zároveň se i zvětšuje plocha kontaktu třísky s nástrojem a dochází ke zvětšení koeficientu přechování třísky, viz obr. 1.5. V oblasti sekundární plastické deformace se již zpevněný materiál znovu plasticky deformuje v závislosti na smykovém napětí, které přesahuje mez kluzu ve smyku. Délka kontaktní zóny, přitlačná síla třísky mají vliv na difuzní a abrazivní procesy na čele nástroje. Zapříčiňuje to teplo vygenerované přeměnou materiálu v třísku s teplem vzniklým třením třísky o čelo nástroje, díky kterým se břit snáze opotřebuje [6, 9].



Obr. 1.5 Mechanismus tvorby třísky pro konvenční a vysokorychlostní obrábění [6].

Jak je již zmíněno v kapitole výše, mechanismus tvorby třísky pro vysokorychlostní obrábění má určité rozdíly oproti konvenčnímu obrábění. Kratší kontaktní zóna, menší tloušťka třísky, větší úhel smykové roviny, vyšší rychlost odchodu třísky. Tím vším se

ovlivňuje i množství předaného tepla mezi třískou, nástrojem a obrobkem, které při vysokorychlostním obrábění ve větší míře odchází spolu s třískou a tudíž nedochází k tak velkému teplotnímu zatížení nástroje a omezí se difuzní opotřebení i napřič skutečnosti, že řezná rychlost se blíží teplotě tavení materiálu obrobku. Růst teploty odcházející třísky se zvyšuje v závislosti na řezné rychlosti až do určitého bodu, kdy se růst rapidně zpomalí a teplota dosahuje svého maxima přibližně při: 600 °C pro obrábění hliníku, 1000 °C pro obrábění Bronzu a 1500 °C pro obrábění ocelí. Závislost teploty na řezné rychlosti viz obr. 1.6 [6, 19].



Obr. 1.6 Rozdělení odváděného tepla v závislosti na řezné rychlosti pro obrábění oceli [6].

Výsledkem použití technologie vysokorychlostního obrábění je chladnější obrobek. Z toho vyplývá, že obrobek má menší tepelné deformace, je tedy přesnější a po obrábění má menší zbytkové pnutí v obrobeném povrchu [6, 19].

Při dalším zvyšování řezné rychlosti se ani nijak výrazně nezvyšuje opotřebení břitu nástroje. Prakticky stejný proces zvyšování teploty a odpevňování materiálu probíhá i při vysokorychlostním tvrdém obrábění, které je zmíněno výše [6, 19].

1.6 Tepelná bilance při HSC

Jelikož při obrábění se prakticky veškerá mechanická práce mění na teplo, je rozbor těchto procesů důležitý při analýze obráběcí technologie. Obzvláště u HSC, kde je teplo jedním z nejdůležitějších činitelů procesů vysokorychlostního obrábění a kde se 98% práce mění na tepelnou energii. Nejlépe zle tepelné procesy popsat následujícími empirickými vztahy [6].

Mechanický výkon, který je zapotřebí pro oddělení třísky:

$$P = (F \cdot v_c) / 60 \text{ [W]} \quad (1.1)$$

Celkové množství tepla vzniklého při odřezávání třísky za jednotku času:

$$Q_c = F \cdot v_c \cdot i \text{ [J/min]} \quad (1.2)$$

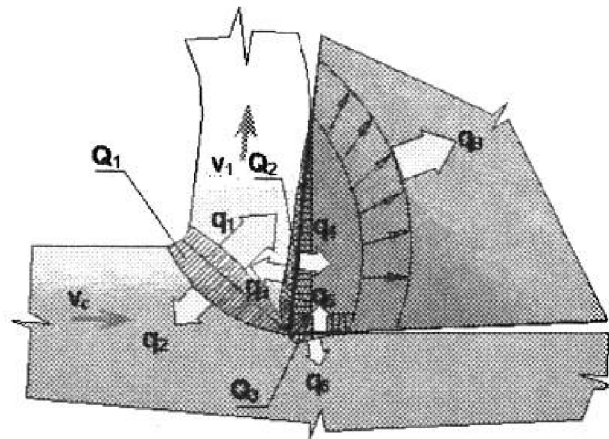
Teplu vzniklé v oblasti sekundární plastické deformace:

$$Q_{SPD} = T \cdot v_1' \cdot i \text{ [J/min]} \quad (1.3)$$

kde: **P** [W] – mechanický výkon,
Q_c [J/min] – celkové množství tepla vzniklé při odřezávání třísky za jednotku času,
Q_{SPD} [J/min] – teplo vzniklé v oblasti sekundární plastické deformace,
F [N] – řezná síla,
T [N] – třecí síla,
v_c [m/min] – řezná rychlost,
v₁' [m/min] - rychlost odcházející třísky,
i [-] – součinitel přeměny mechanického výkonu na teplo ($i > 0,95$) [6].

Z rovnice 1.1 lze vyvodit, že množství mechanické energie potřebné pro oddělení třísky za jednotku času roste úměrně součinu řezné síly a řezné rychlosti. Během procesu vysokorychlostního obrábění sice řezná síla poněkud klesá, ale současně roste řezná rychlost, která klesající sílu převáží. Z toho důvodu je důležité používat obráběcí stroje s vyššími výkony [6].

Dle závislosti v rovnici 1.2 lze vyvodit, že s růstem řezné rychlosti roste i množství tepla vygenerovaného v oblasti primární plastické deformace a v této souvislosti zde roste i teplota. Tudiž na určitém bodě vyznačujícím danou hodnotu řezné rychlosti dojde ke snížení pevnosti obráběného materiálu, díky čemuž se sníží i řezné síly a v závislosti na tom se zpomalí růst střední teploty řezání. Zpomalení závisí na rovnici 1.3, na množství tepla vzniklého v oblasti sekundární plastické deformace třením odcházející třísky o čelo nástroje. Odpevňující účinek se příznivě uplatňuje i při obrábění těžkoobrobitelných materiálů, kde se často HSC publikuje jako prostředek pro zlepšení obrobitelnosti těchto materiálů [6].



Obr. 1.7 Oblasti vzniku tepla a směry jeho šíření [6].

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3 = q_B + q_t + q_o + q_{pr} \text{ [J/min]} \quad (1.4)$$

- kde: Q_c [J/min] – celkové teplo,
 Q_1 [J/min] – teplo vzniklé v oblasti primární plastické deformace,
 Q_2 [J/min] – teplo vzniklé v oblasti sekundární plastické deformace,
 Q_3 [J/min] – teplo vzniklé v oblasti terciální plastické deformace,
 q_B [J/min] – teplo odvedené břitem nástroje,
 q_t [J/min] – teplo odvedené třískou,
 q_{1-6} [J/min] – jednotlivé toky tepla,
 q_o [J/min] – teplo odvedené obrobkem,
 q_{pr} [J/min] – teplo odvedené do prostředí [6].

Při obrábění křehkých materiálů má oblast primární plastické deformace menší velikost a tudíž i složka Q_1 bude malá. V případě, že začne vznikat drobná či článkovitá tříška, plocha styku mezi třískou a čelem nástroje bude velmi úzká a tudíž i složka Q_2 bude malá. Pak tedy hlavním zdrojem tepla bude složka Q_3 , která vzniká třením v místě styku hřbetu nástroje s obrobkem a prací pružných deformací [6].

Teplo Q_1 , vznikající při tvorbě třísky z největší části odchází s třískou, teplo je na obr. 1.9 označeno jako q_1 , v menší míře pak přechází teplo do obrobku znázorněno jako q_2 . Do odcházející třísky přechází také velké množství tepla q_3 , které vzniká třením ve styku třísky s čelem nástroje. Celkové množství tepla odcházející s třískou [6]:

$$q_t = q_1 + q_3 \text{ [J/min]} \quad (1.5)$$

Do břítu pak přechází zbytek tepla ze styku třísky s čelem nástroje q_4 a pak také část tepla vzniklého v oblasti terciální plastické deformace q_5 . Celkové množství tepla přecházející do břítu nástroje [6]:

$$q_B = q_4 + q_5 \text{ [J/min]} \quad (1.6)$$

Části vznikajícího tepla q_2 a q_6 pak přecházejí do obrobku.

$$q_o = q_2 + q_6 \text{ [J/min]} \quad (1.7)$$

Velký vliv na velikost tepla q_4 má vodivost povlaku na destičkách SK. Pokud je tepelná vodivost povlaku nižší, nepřechází do břítu nástroje tak velké množství tepla, které pak odchází s třískou. V závislosti na q_4 je taky při nižších hodnotách nižší vymílání čela břítu. Obecně platí, že povlaky, které ve svém složení nemají čistě kovové složky a jsou tvořeny směsí nitridů, karbidů a oxidů kovů mohou působit téměř jako izolační vrstva. Vhodné je používat i povlaky s antifrikčním účinkem, který má pozitivní vliv na množství vzniklého tepla třením [6].

Za předpokladu, že při vysokorychlostním obrábění se odvádí až 99% tepla odcházející třískou, lze odvodit rovnice pro vznik a odvod tepla [16, 17].

Teplota třísky:

$$t_t = \frac{F \cdot v_c \cdot q \cdot q_t}{10^4 \cdot m_t \cdot c} + t_o \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1.8)$$

kde: t_t [°C] – teplota třísky,
 q [%] - podíl práce přeměněné v teplo,
 q_t [%] – podíl tepla přecházejícího do třísky,
 m_t [kg] – hmotnost třísky,
 c [J/kg.K] – měrná tepelná kapacita [16, 17].

1.7 Vliv řezných podmínek na proces HSC obrábění

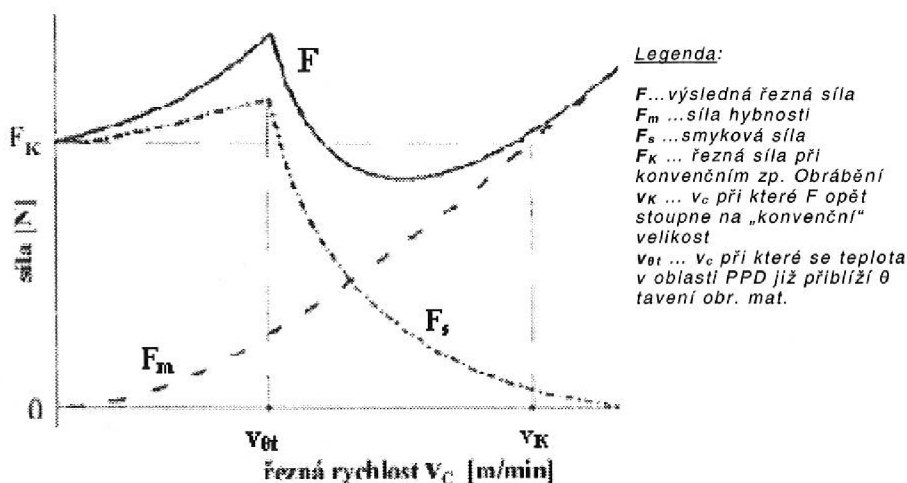
1.7.1 Vliv řezné rychlosti v_c na tvorbu třísky:

S rostoucí hodnotou řezné rychlosti se zužuje oblast primární plastické deformace a zvětšuje se úhel střížné roviny. V oblasti vysokorychlostního obrábění se oblast primární plastické deformace koncentruje do úzkého smykového pásu v okolí smykové roviny v závislosti na omezení šíření kluzu v polykrystalech materiálu. Při zvyšování řezných rychlostí se výrazněji snižuje intenzita plastických deformací materiálu při tvorbě třísky a při HSC obrábění nedochází téměř k žádným plastickým deformacím [6].

Z hlediska tvorby třísky je znám vznik dvou druhů třísek, je to tříška soudržná a tříška elementární. Dále pak podle plastických deformací se dělí tříška soudržná na třísku plynulou nebo článkovitou. Druh vzniklé třísky závisí z velké části na řezné rychlosti v_c . Při HSC obrábění je pozorován vznik všech druhů třísek. Při nízkých řezných rychlostech se pro jeden řezný materiál může vytvářet tříška soudržná plynulá a od určité řezné rychlosti se začne vytvářet tříška soudržná článkovitá. Po překročení dalšího bodu řezné rychlosti se bude vytvářet tříška elementární [6, 12].

1.7.2 Vliv řezné rychlosti na řezné síly:

Bylo experimentálně potvrzeno, že řezná síla při vysokorychlostním obrábění s dále rostoucí řeznou rychlostí klesá až do určitého bodu, kde dosáhne minima. Poté má síla tendence opět růst s rostoucí řeznou rychlostí [6].



Obr. 1.8 Teoretické chování složek řezné síly a jejich výslednice při vysokých řezných rychlostech [6].

Jak vyplývá z obr. 1.8, celková řezná síla je ovlivňována dvěma složkami a to smykovou složkou a složkou síly hybnosti. V rozmezí od řezných rychlostí konvenčních po řeznou rychlost v_{0t} je celková síla ovlivněna hlavně složkou smykové síly. V následujícím rozmezí od v_{0t} po v_k se začíná v celkové síle projevovat složka síly hybnosti, naopak vliv smykové síly klesá. Při rychlostech nad v_k má složka smykové síly mizivý vliv a celková síla je určena už jen silou F_m . Z toho vyplývá, že v praxi by řezné síly neměly přesáhnout hodnotu v_k , jelikož po překročení tohoto bodu se velikost řezné síly zvětšuje nad hodnotu sil při konvenčním obrábění. Při zvýšení řezných sil nad hodnoty docílené při konvenčním obrábění, by vysokorychlostní obrábění ztratilo svoji výhodnost. Při zvyšování řezné rychlosti a s tím spojených nákladů by se docílilo vyšších odporů při obrábění [6, 12, 14].

Snižování řezných sil, které se projevuje u všech materiálů obráběných technologií HSC, nesníží potřebný výkon stroje. Výkon je součin řezné síly a řezné rychlosti, takže i přes snížení řezných sil potřebný výkon roste, jelikož snížení řezných sil se nevyrovná hodnotě, o kterou se navýší řezná rychlost [6].

1.7.3 Vliv řezné rychlosti na integritu povrchu obrobku:

U HSC obrábění dochází díky vysoké řezné rychlosti zúžení oblasti primární plastické deformace. Plastická deformace je velmi malá a téměř nezasahuje pod úroveň roviny řezu. Velikost zpevnění obrobeného povrchu tedy závisí bezmála pouze na terciální plastické deformaci. Z toho vyplývá, že použitím HSC obrábění se snižuje zpevnění obrobeného povrchu [6, 19].

Další výhodou při Vysokorychlostním obrábění je menší množství tepla, které přechází do obrobku. Povrch obrobku díky tomu nepodléhá vysokému tepelnému zatížení, což má příznivý vliv na výsledné tahové pnutí na povrchu obrobku. Díky nižšímu množství tepla přecházejícímu do obrobku také nedochází ke strukturním změnám v povrchových vrstvách, což je velice výhodné pro obrábění zakalených materiálů [6, 19].

1.7.4 Vliv řezné rychlosti na trvanlivost břítu nástroje:

Při zvyšování řezné rychlosti dochází ke zvýšení střední teploty řezání až k teplotě tavení daného materiálu. Jelikož je intenzita opotřebení břítu přímo závislá na teplotě řezání, vytváří opotřebení omezující faktor pro zvyšování řezné rychlosti [1, 6].

Při HSC obrábění jsou hlavními činiteli ovlivňující trvanlivost chemické rozpouštění a difúze. Chemické rozpouštění je z těchto dvou činitelů nejvýznamnější, v podstatě se jedná o rozpouštění řezného materiálu v odcházející třešce. Druhým činitelem je difúze, která je přímo úměrná k teplotě řezání. Při vysokých teplotách se částice obráběného materiálu navaří na čelo břítu. Tím vznikne vrstva materiálu, která se nasycuje difundujícími prvky řezného materiálu. Jelikož se difuzivita exponenciálně zvyšuje s narůstající teplotou, další zvyšování řezné rychlosti má za následek rychlý nárůst intenzity opotřebení [1, 6].

1.7.5 Velikost posuvu, hloubka řezu:

Hodnoty velikosti posuvu a hloubky řezu mají u HSC obrábění přibližně stejný vliv jako u konvenčního obrábění, avšak je velmi důležité jejich hodnoty vždy volit v určitém rozmezí. Tyto rozmezí jsou pak závislé na mnoha faktorech při konkrétním obráběním

procesu. Z hlediska velikosti řezných sil, je pro jejich minimalizaci nejvhodnější čtvercový průřez třísky [1, 6].

Vlivy posuvu a hloubky řezu:

- se zvětšující se velikostí posuvu klesá součinitel pěchování, rostou řezné síly, roste střední teplota řezání a snižuje se trvanlivost bříty, za stálé řezné rychlosti,
- s rostoucí hloubkou řezu klesá měrný řezný odpor, klesá součinitel pěchování, roste střední teplota řezání, rostou řezné síly a snižuje se trvanlivost bříty nástroje, za stálé řezné rychlosti [1, 6].

1.8 Řezné nástroje pro HSC

Pro dosažení optimální trvanlivosti bříty a zároveň docílení malých řezných sil je důležité zvolit správnou geometrii bříty. Pro každý materiál je doporučena trochu jiná geometrie. Pro hliníkové slitiny je nutno, při použití technologie HSC, volit úhel čela v rozmezí 12° až 17°, úhel hřbetu 13° až 15° a úhel sklonu ostří mezi 20° až 25°. U oceli se však doporučuje úhel čela 0° a úhel hřbetu 16°. Pro těžkoobrobitelné materiály se optimálně volí úhel hřbetu až 20° [4, 6, 9].

Pro obrábění HSC je důležité, ještě více než volba správné řezné geometrie, volba vhodného řezného materiálu. U nástrojů pro použití při HSC obrábění je důležité zamezit náhlým lomům vlivem tepelných nebo mechanických šoků. Proto musí mít materiály vysokou houževnatost, tvrdost povrchu a dobrou odolnost vůči chemickému působení. Tyto vlastnosti musí mít řezný materiál i při vystavení vysokým teplotám. Vhodné materiály pro vysokorychlostní obrábění oceli jsou např. povlakované karbidy a cermety, pro litiny řezná keramika a pro neželezné materiály lze využít i polykrystalické diamanty, za podmínky, že řezná teplota nepřesáhne 700 °C. Pro obrábění kalených ocelí a tvrdších materiálů je vhodný kubický nitrid bóru, ale využívá se pro obrábění i klasických ocelí a litin [4, 6, 9].

1.9 Obráběcí stroje pro HSC

Aplikace HSC technologie přináší nové nároky na obráběcí stroje. Stroje vyráběné pro tuto technologii mají několikanásobně vyšší výkon a současně i značnou šířku technologie a pružnost ve výrobním procesu. Pro HSC obráběcí rotačních součástí je nejvhodnější využít čtyř až pětiosá soustružnická centra [4, 6, 21].

Vysokorychlostní obrábění vyžaduje od obráběcího stroje vysokou tuhost soustavy S-N-O (Stroj-Nástroj-Obrobek). Proto je pro konstrukci stroje důležitý tuhý a lehký rám stroje,

většinou s dobrým útlumem mechanických šoků a vibrací. Další důležitou částí jsou vřetena, na která jsou kladeny velké nároky ohledně počtu otáček za minutu a krouticích momentů při nízkých otáčkách. Vřetena bývají obvykle konstruována s integrovaným elektromotorem, díky čemuž odpadá nutnost mechanických převodů. Otáčky využívaných obráběcích strojů se pohybují od 15 000 až 70 000 ot.min⁻¹ a u speciálních strojů dosahují i přes 100 000 ot.min⁻¹ [4, 6, 21].

U HSC technologie se ale nejedná pouze vysoké řezné rychlosti, ale také o posuvové rychlosti, které také dosahují vysokých hodnot. V praxi se spíše řeší požadované zrychlení, než řezné síly, jelikož ty jsou u HSC technologie nízké. Běžně dosahované rychlosti posuvu jsou 40 až 50 m.min⁻¹, ale pro zařízení vybavena lineárním pohonem může posuvová rychlost dosáhnout až 120 m/min [4, 6, 21].

1.10 Řídicí systémy pro HSC

Nezbytnou podmínkou pro optimální využití všech výhod, které vysokorychlostní obrábění nabízí je použití vhodného CAM systému. Nutností je, aby byl schopen dodržovat při obrábění zásady vysokorychlostního obrábění [4, 13]:

- rovnoměrnost odebíraného materiálu. Pomocí NC programu je nutno zajistit, aby úběr materiálu byl konstantní, v průběhu obrábění se tloušťka třísky nesmí měnit,
- stejná velikost přídavku po odebrání nástrojem. Správně zvolená metoda musí rozpoznat křivosti výsledné plochy a vytvořit dráhy tak, aby byla velikost přídavku rovnoměrná na všech obráběných plochách,
- hladké najetí a přesunutí do další řezné hladiny. Je nutné, aby tyto přechody byli co nejplynulejší. Nevznikají pak mechanické šoky, díky čemuž se zvýší životnost nástroje i stroje a zlepší se výsledná kvalita povrchu obrobku,
- minimalizace namáhání nástroje. Důležité především při najíždění nástroje do plného materiálu,
- plynulost dráhy nástroje. Důležitá podmínka při HSC obrábění, při zajíždění a vyjíždění dráha nesmí obsahovat ostré přechody. Zabráni se tím poškození stroje při rychlém brzdění posuvu a následném zrychlení [4, 13].

1.11 Výhody a nevýhody aplikace vysokorychlostního obrábění

Výhody:

- díky vysokým řezným rychlostem roste i množství odebraného materiálu za jednotku času. Většinou se toto navýšení pohybuje okolo 35 %,
- v důsledku vyšších otáček vřetena je umožněna vyšší rychlost posuvu za stejné tloušťky odebírané vrstvy,

- snížení řezných sil,
- snížení strojních časů,
- zvýšení podílu tepla odváděného třískou,
- menší tepelné ovlivnění obrobku,
- zvýšení rozměrové přesnosti obrobku a zlepšení kvality obrobených ploch,
- omezení vzniku chvění soustavy S-N-O přesunem řezných podmínek mimo rozsah kritických vibrací,
- HSC technologie umožňuje optimální obrábění tenkých obrobků, např. tenkých stěn [4, 6, 9].

Nevýhody:

- nákladné strojní vybavení,
- nutnost speciálních nástrojů,
- speciální upínání nástrojů, nutnost vyvažování rotačních nástrojů,
- odstraňování velkého množství třísek za jednotku času,
- zvýšení intenzity otupování břitů,
- vyšší opotřebení částí strojů díky vysokým hodnotám zrychlení a zpomalení během obrábění,
- vyšší nároky na odbornost obsluhy,
- zvýšení nákladů pro zajištění bezpečnosti obsluhy [4, 6, 9].

1.12 Bezpečnost práce při HSC

Vysoké otáčky vřetene a tím spojené vysoké řezné rychlosti přináší jisté výhody, ale i nebezpečí. Kinetická energie uvolněná při destrukci nástroje odpovídá energii vystřeleného projektilu ze střelné zbraně. Z toho důvodu musí být kryty stroje dimenzovány, aby nedošlo k ohrožení zdraví obsluhy. Kryty musí být také vybaveny bezpečnostním spínačem, aby nebylo možné otevřít stroj za chodu. Funkce krytu jsou chránit před úlomky při destrukci nástroje, před odcházejícími třískami, kapalinami nebo mlhou a také před zdraví škodlivým kovovým prachem. V neposlední řadě kryt snižuje množství hluku v okolí stroje při obrábění. Kryty jsou vyráběny většinou z oceli a v průhledných oblastech se používá polykarbonát [4, 6, 9, 18].

Stejně důležité, jako jsou kryty a konstrukce stroje pro bezpečnost práce, jsou i požadavky na odbornost obsluhy stroje a dalšího personálu spojeného s výrobním procesem. Personál by měl být řádně zaškolen se strojem i s bezpečností práce s ním spojenou [4, 6, 18].

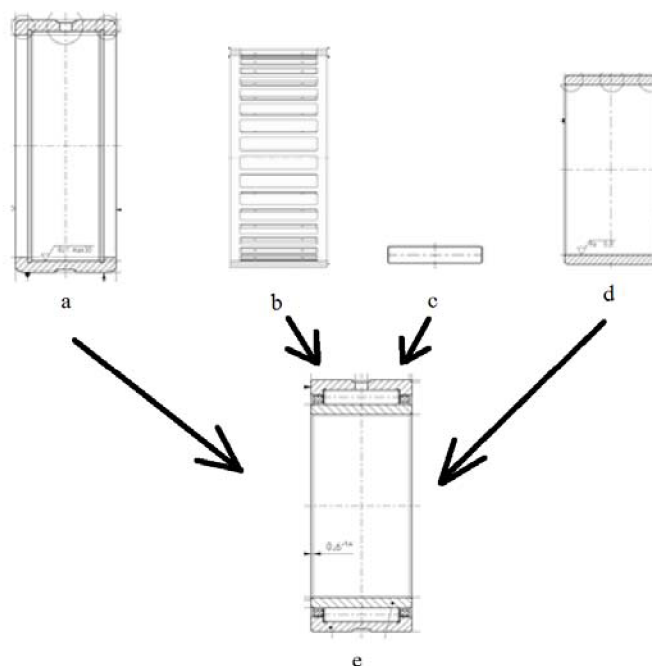
2 ANALÝZA STÁVAJÍCÍHO STAVU OBRÁBĚNÍ LOŽISEK Z HLEDISKA TECHNOLOGIE TŘÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ

Následující kap. se zabývá analýzou stávajícího výrobního procesu ve firmě INA SKALICA spol. s r.o. Vyrábí se zde přes 12 000 základních výrobků, ze kterých ještě několik má různé varianty zhotovení. Portfolio produktů viz obr. 2.1 se skládá z ložiskových klecí, vnitřních a vnějších kroužků ložisek, jehličkových ložisek, napínacích kladek, podložek, cylindrických ložisek a synchronních kroužků [2, 26, 27].



Obr. 2.1 Ukázka výrobků v podniku INA SKALICA spol. s r.o. [26, 27].

Jak je již zmíněno v úvodu, podnik se dělí na 13 segmentů. Technologie na jednotlivých segmentech se liší podle spektra výroby daného segmentu. V podniku jako celku se běžně využívají technologie soustružení, vrtání, tepelné zpracování, broušení, lapování, superfinišování, honování a pro výrobu tvářením stříhání a ohýbání. Každá technologie se využívá dle potřeby pro zhotovení výrobku. V podniku probíhá zároveň s výrobou i montáž jednotlivých výrobků, z velké většiny ložisek. Pro montáž se využívají komponenty vyráběné přímo v podniku a kompletují se spolu s některými komponenty dováženými, jako jsou např. valivé segmenty u valivých ložisek [2, 26].



Obr. 2.2 Ukázka montáže jehličkového ložiska a) vnější kroužek, b) ložisková klec, c) valivý segment ložiska (jehlička), d) vnitřní kroužek, e) sestava jehličkového ložiska [2, 26].

Jako vhodný příklad výroby v podniku INA SKALICA spol. s r.o. je výroba a montáž jehličkového ložiska viz obr. 2.2. Ložisko se skládá z vnějšího kroužku, ložiskové klece, valivých segmentů a vnitřního kroužku. Mimo valivých segmentů se všechny komponenty vyrábí přímo v podniku. Pro tuto práci jsou podstatné vnitřní a vnější kroužky, které se vyrábí soustružením z bezešvých trubek většinou z materiálu 100Cr6 [2, 26].

2.1 Materiál 100Cr6

Označením 100Cr6 je ocel označena dle normy EN 101 32-4. Dle normy ČSN 41 4109 se jedná o chromovou ocel pro valivá ložiska označenou 14 109. Jako vstupní materiál se využívají trubky od dodavatele Ovako a Rohrwerk Maxhütte [2, 22, 26].

Obecně oceli třídy 14 jsou legovány chromem, manganem, křemíkem či hliníkem. Jsou jedny z nejvíce používaných slitinových ocelí, jelikož dosahují dobrých vlastností i bez použití nedostatkových prvků. Obvykle se kalí, cementují, některé jsou určeny k nitridaci. U těchto ocelí se kladou vysoké nároky na čistotu a mikročistotu materiálu, sledují se převážně nekovové vměstky. Chromové oceli jsou vhodným a v současnosti hojně využívaným materiálem pro výrobu součástí valivých ložisek [23].

Ocel 14 109 je vhodná pro výrobu kuliček do průměru 25 mm, válečků a kuželíků do průměru 18 mm a kroužků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm. Běžně se materiál

používá pro výrobu polotovarů, jako jsou předvalky, výkovky, tyče válcované za tepla nebo tažené za studena a na výrobu bezešvých trubek tvářených za tepla. V této práci se řeší výroba ložiskových kroužků, které se vyrábí z bezešvých trubek tvářených za studena. Pro mechanické vlastnosti materiálu v tomto stavu je mez pevnosti $R_m = 608$ až 726 MPa, tažnost $A_5 = 18\%$ a tvrdost max. 220 HB [22, 23].

Tab. 2.1 Chemické složení oceli 14 109 [hm. %] [23].

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ni+Cu	P	S
0,90-1,10	0,30-0,50	0,15-0,35	1,30-1,65	max 0,30	max 0,25	max 0,50	max 0,027	max 0,03

Ocel je dobře tvářitelná za tepla a je vhodná k přímému kalení. Po tepelném zpracování žiháním na měkko je materiál dobře obrobitelný. Vhodná tloušťka pro zušlechťení je 20 mm. Obrobky z této oceli jsou vhodné pro konstrukce, kde je potřeba u součásti velmi tvrdý povrch odolný proti opotřebení [22].

2.2 Používané stroje

Firma INA SKALICA spol. s r.o. používá velkou škálu obráběcích strojů. Celkově výroba v této firmě je značně rozsáhlá, čemuž samozřejmě odpovídá i příslušné strojní vybavení. Z hlediska soustružení podnik vlastní velké množství strojů. Tyto stroje lze rozdělit do tří základních skupin na soustružnické automaty jednovřetenové nebo vícevřetenové, CNC soustružnická centra a CNC soustruhy [2, 25, 26].

2.2.1 Soustružnické automaty

Jako typický zástupce jednovřetenových soustružnických automatů využívaných firmou lze uvést stroje INDEX B42, B60 a jejich různé modifikace. Za vícevřetenové soustružnické automaty mají největší zastoupení šestivřetenové soustružnické automaty od firmy SCHÜTTE konkrétně typy SD a SF [2, 25, 26].

Soustružnický automat SCHÜTTE SD 80

Jedná se o soustružnický automat od firmy SCHÜTTE. Stroj je vybaven šesti průchozími vřeteny, kterými může procházet kruhový polotovar až do průměru 80 mm. Stroj váží přibližně 10 000 kg a má rozměry 6,2 x 2 x 2,5 m [2, 25, 26].



Obr. 2.3 Soustružnický automat SCHÜTTE SD [2, 26].

2.2.2 CNC soustružnická centra

CNC soustružnická centra se na rozdíl od soustružnických automatů, využívají většinou pouze na menší zakázky. Vyrábí se na nich zakázky menší než 5000 ks. Nejvíce využívané stroje tohoto typu jsou od výrobce TRENS a to konkrétně typy SLB 500 a SLB 700. Jako další lze uvést stroje od výrobce GILDEMEISTER typy CTX a TWIN [2, 25, 26].

Soustružnické centrum GILDEMEISTER TWIN 65 a 117:

Tab. 2.2 Technické parametry soustružnických center GILDEMEISTER TWIN 65 a 117 [2, 25, 26].

	TWIN 65 / 117
Max. soustružený průměr	250 / 270 mm
Max. průměr tyčového polotovaru	65 / 120 mm
Max otáčky hl. vřetena	5000 / 3200 min ⁻¹
Výkon	35 / 41 kW
Krouticí moment	270 / 480 N.m
Rychloposuv příčného suportu	30 000 mm.min ⁻¹
Pracovní zdvih	190 mm
Rychloposuv podélného suportu	30 000 mm.min ⁻¹
Počet nástrojových pozic	12
Max. průřez nože	25 x 25 mm
Upínací systém	VDI40
Výkon motoru pro pohon nástrojů	11,7 kW
Max. krouticí moment	28 N.m
Max. otáčky	4000 m.min ⁻¹



Obr. 2.4 Soustružnické centrum GILDEMEISTER TWIN [2, 26].

Na obr. 2.4 je soustružnické centrum GILDEMEISTER TWIN. Na pozicích 1 a 2 jsou označeny horní a dolní revolverové nástrojové hlavy. Na pozici 4 je označeno hlavní vřeteno a na pozici 3 pomocné vřeteno tzv. protivřeteno. Na pozici 5 je odebírací zařízení součástí, na pozici 6 ovládací panel a na pozici 10 je označeno manuální ovládání upínání a odepínání hlavního a pomocného vřetena spouštěné nohou. Dále pak v levé části obr. 2.4 jsou pozice 7, 8, 9, kde 7 je zařízení na stabilizaci vodicích trubek, 8 je automatický nakladač a pozice 9 označuje ovládání pro automatický nakladač [2, 26].

Soustružnické centrum GILDEMEISTER CTX 410, 510 a 620:

Tab. 2.3 Technické parametry soustružnických center GILDEMEISTER CTX 410, 510 a 620 [2, 25, 26].

	CTX 410 / 510 / 620
Max. soustružený průměr	500 mm
Max. průměr tyčového polotovaru	65 / 92 / 122 mm
Max otáčky hl. vřetena	6000 ot ⁻¹
Výkon	27 / 20 kW
Krouticí moment	170 N.m
Rychloposuv příčného suportu	30 000 mm.min ⁻¹
Pracovní zdvih	190 mm
Rychloposuv podélného suportu	30 000 mm.min ⁻¹
Počet nástrojových pozic	12
Max. průřez nože	25 x 25 mm
Upínací systém	VDI40
Výkon motoru pro pohon nástrojů	5,4 kW
Max. krouticí moment	18 N.m
Max. otáčky	5000 min ⁻¹



Obr. 2.5 Soustružnické centrum GILDEMEISTER CTX 510 [2, 26].

Soustružnické centrum TRENS SBL 500 a 700:

Tab. 2.4 Technické parametry soustružnických center TRENS SBL 500 a 700 [2, 24, 25, 26].

	SBL 500 / 700
Max. soustružený průměr	410 / 500 mm
Max. průměr tyčového polotovaru	74 / 107 mm
Max otáčky hl. vřetena	4200 / 2500 ot ⁻¹
Výkon	22 / 37 kW
Krouticí moment	196 / 484 N.m
Rychloposuv příčného suportu	20 000 / 16 000 mm.min ⁻¹
Pracovní zdvih	270 / 420 mm
Rychloposuv podélného suportu	30 000 / 20 000 mm.min ⁻¹
Počet nástrojových pozic	12
Max. průřez nože	25 x 25 / 32 x 32 mm
Upínací systém	VDI40
Výkon motoru pro pohon nástrojů	6,1 / 7,8 kW
Max. krouticí moment	13 / 27 N.m
Max. otáčky	4000 / 2750 ot ⁻¹



Obr. 2.6 Soustružnické centrum TRENS SLB 500 [2, 26].

2.2.3 CNC dokončovací soustruhy

CNC dokončovací soustruhy jsou stroje vlastní konstrukce skupiny SCHAEFFLER. Jedná se o stroj označený jako EDM 101 CNC. Jsou využívány pro dokončování součástí, např. dokončení vnitřních oběžných drah vnějšího kroužku ložiska. Součástky jsou nejdříve obrobena na soustružnickém automatu, následně pak podle potřeby dokončeny na stroji EDM 101 CNC. Další využití mají tyto stroje při obrábění vnějších kroužků ložiska z výkovků. Stroj se dobře uplatňuje, dle použitého nářadí, při sloučených nebo i samostatných obráběcích operacích [2, 25, 26].

Tab. 2.5 Technické parametry CNC dokončovacího soustruhu EDM 101 CNC [2].

Max. otáčky	3000 ot ⁻¹
Výkon vřetena	11 kW
Max. upínací průměr	100 mm
Počet nástrojových pozic	8



Obr. 2.7 Dokončovací CNC soustruh EDM 101 CNC [2, 26].

2.2.4 Typové řady kroužků vyráběné v podniku INA SKALICA spol. s.r.o.

- AU.NK **/** - vnější kroužky s jednou jehličkovou oběžnou dráhou,
- AU.RNA **** - vnější kroužky s dvěma jehličkovými oběžnými drahami,
- AU.NKA **** - vnější kroužky s jednou jehličkovou a jednou kuličkovou oběžnou dráhou, oběžné dráhy jsou radiálně uloženy,
- AU.NKX ** - vnější kroužky s kombinací radiální jehličkové oběžné dráhy a axiální kuličkové oběžné dráhy, osazené v boční přírubě,
- AU.NX ** - vnější kroužky s kombinací jehličkové oběžné dráhy a axiální kuličkové oběžné dráhy, osazené na čele kroužku,

- F - ***** - AU. (možné všechny předchozí varianty) - jedná se o vnější kroužky pro konkrétního zákazníka, např. BMW, VW, Škoda apod.
- F - ***** - IR - jedná se o vnitřní kroužky, komponenty do vnějších kroužků pro konkrétního zákazníka,
- IR.**x**x** - jedná se o vnitřní kroužky, komponenty do vnějších kroužků typu AU.NK a AU.RNA,
- IR.NKIB **** - vnitřní kroužky, komponenty pro vnější kroužky typu AU.NKA.
- RG.NKIB **** - vnitřní kroužky tvaru podložky, komponenty do vnějších kroužků typu AU.NKA,
- WS.NKX ** - kroužky tvaru podložky, komponenty do vnějších kroužků typu AU.NKX.
- WS.NX ** - kroužky tvaru podložky, komponenty do vnějších kroužků typu AU.NX [2, 26].

2.2.5 Technologie soustružení na CNC strojích a soustružnických centrech

Podnik INA SKALICA spol. s r.o. používá pro CNC stroje a CNC soustružnická centra kombinaci NC programu a nastavovacího plánu. Technologický postup v podobě NC programu určuje pořadí technologických operací, technologické parametry, dráhy nástrojů a pomocné funkce. Nastavovací plán na rozdíl od NC programu neobsahuje postupy, ale konkrétní nářadí, upínače a přípravky ke konkrétním technologickým operacím [2, 26].

2.3 Držáky nástrojů s VBD

Prakticky všechny soustružnické stroje používané podnikem INA SKALICA spol. s r.o. jsou vybaveny revolverovými hlavami. Do těchto hlav se nástroje upínají pomocí držáků nástrojů Zürn a WTO. Nástrojový držák má válcovou stopku, na které jsou vytvořeny drážky, které zapadají do zámku v revolverové hlavě. Využívaný průměr válcové stopky je 40 mm, s výjimkou stroje EDM 101 CNC, který využívá držáky s průměrem stopky 20 mm [2, 26, 28].



Obr. 2.8 Ukázka nástrojových držáků od firmy Zürn [26, 28].

2.4 Nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami

V podniku INA SKALICA spol. s r.o. se využívá velmi široká škála těchto nástrojů. Dle využití je lze rozdělit na nástroje pro vnější soustružení, vnitřní soustružení, zapichování a upichování. Podnik využívá nástroje od různých výrobců, jako je Sandvik Coromant, Mitsubishi, Seco Tools, Iscar a Pramet [2, 26].

2.5 Vyměnitelné břitové destičky

Nejvyužívanější materiály vyměnitelných břitových destiček (VBD) pro obrábění materiálu 100Cr6 jsou slinuté karbidy s povlaky CVD a PVD. Při volbě nástrojů se nejčastěji využívají destičky čtvercové, kruhové, trojúhelníkové a tzv. trigonometrické. Dále se využívají destičky jak s negativní geometrií s úhlem hřbetu 0° , tak destičky s pozitivní geometrií nejčastěji s úhly hřbetu 7° a 11° [2, 26].

Při výběru VBD se technolog, popřípadě programátor řídí jistými pravidly a zkušenostmi. Např. při výběru VBD pro operaci hrubování, je vhodné vybrat destičku s co největším úhlem špičky, čímž se zabezpečí tuhost, ale značně se omezí možnosti pohybů, které je možné při operaci provádět. Velikost VBD se volí podle obráběcí operace a hloubky řezu a_p , pro kterou se musí přizpůsobit i úhel nastavení hlavního ostří κ_r . Pro operace hrubování není důležitá drsnost povrchu, proto se volí i poloměr špičky r_ϵ co největší. Naopak pro dokončovací operace je důležité volit vhodné hodnoty pro poloměr ostří i pro posuv f_n , aby byly dosaženy požadované vlastnosti obrobeneho povrchu. Výběr utvařeče třísky se ve firmě volí výhradně na základě zkušeností. Např. VBD od firmy Sandvik Coromant dosahují nejlepší výsledky PR a PM pro hrubování a PF a MF pro dokončovací operace [2, 26].

2.6 Vzorová součást

Jako vzorová součást byl zvolen vnější kroužek jehličkového ložiska. Jedná se o jeden z kroužků typové řady EDS NK 50/25 viz kapitola 2.2.4. Kroužek je vyroben z již zmiňovaného materiálu 100Cr6.

průměru pro průchozí vřeteno umožňuje obrábění kroužků z takto velkých polotovarů. Následuje tzv. soustružení „na měkko“.

Tab. 2.6 Přehled sledu soustružnických operací pro výrobu vnějšího kroužku jehličkového ložiska.

číslo polohy	Operace pro příčnou nástrojovou hlavu		Operace pro podélnou nástrojovou hlavu	
	Název operace	Nástroj	Název operace	Nástroj
0010	Soustružení vnějšího průměru	WNMG 080408 F5 TP2500	Hrubování vnitřního průměru	SNMG 120408-QM4235
0020	Kontrola vnějšího průměru	pravítko DD 119 N	Hrubování oběžné jehličkové dráhy	TCMT 16T308 TN7035
0030	Zapichování mazací drážky	Tvarový nástroj T-xxx	Přední zápich na oběžné jehličkové dráze	Tvarový stopkový nástroj
0040	Kontrola rozměrů	pravítko DD 119 N	Dokončování oběžné jehličkové dráhy	TCMT 16T304 TN7035
0050	Zapichování vnějšího tvaru	Tvarový nástroj T-xxx	Zadní zápich na oběžné jehličkové dráze	Tvarový stopkový nástroj
0060	Upichnutí součásti	PENTA 34R150PB-6D	Zarovnání čela s vnitřní hranou 45°	T-xxx

V tab. 2.6 jsou vypsány úkony provádějící se během soustružení kroužku ložiska. Jak lze vidět, postup se dělí na šest poloh a na každé poloze se provádí dvě operace. Řezné rychlosti při soustružení jsou $69 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ pro soustružení vnějších rozměrů a $63 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ pro soustružení rozměrů vnitřních. Rychlosti odpovídají nastavení stroje na $355 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Hodnoty posuvových rychlostí jsou pak nastaveny pro každou operaci zvlášť.

Soustružené kroužky nejsou zakaleny a jejich tvrdost povrchu odpovídá přibližně hodnotě 160 HV. Je tedy nutno kroužky dále zakalit. Kalení probíhá na kalících a popouštěcích linkách od firmy AICHELIN viz obr. 2.11.



Obr. 2.11 Kalicí a popouštěcí linka od firmy AICHELIN [26, 27].

Požadavky pro kalení na tvrdost povrchu jsou u vzorového kroužku zadány na $60 + 4$ HRC. Toho se dosahuje zahřáním materiálu na teplotu $830\text{ }^{\circ}\text{C}$, výdrží po dobu 25 minut a následným zchlazením do oleje. Následuje pak proces popouštění, který se realizuje při teplotě $175\text{ }^{\circ}\text{C}$, na které materiál setrvá po dobu 120 minut a následně se chladí na vzduchu.

Během procesu kalení a popouštění dochází ke změnám ve struktuře materiálu a tudíž i ke změnám na povrchu. Rozměrová přesnost po kalení není zaručena a proto je již při soustružení důležité nechat přídatky na broušení. Po kalení tedy následují operace broušení. Konkrétněji broušení čel, povrchu a vnitřní oběžné jehličkové dráhy.

Firma INA SKALICA spol. s r.o. disponuje poměrně velkým strojovým parkem ohledně bezhrotých brusek. Obecně se využívají povrchové brusky, brusky pro broušení otvorů a zapichovací brusky. Pro vzorový kroužek se využívají 2 typy brusek. Pro broušení čel a pro broušení povrchů se využívají brusky JUNKER Saturn 60 a následně pro broušení vnitřní oběžné jehličkové dráhy se využívají brusky pro broušení otvorů typu NOVA 2GR 10/65, viz obr. 2.12.



Obr. 2.12 Bruska pro broušení otvorů typu NOVA 2GR 10/65 [26, 27].

Po operacích broušení jsou u kroužků náhodně kontrolovány požadované rozměry, tolerance a předepsané drsnosti povrchů. Následně jsou pak převezeny k montáži, kde se na automatech kompletují vnější kroužky s kroužky vnitřními, jehličkovou klecí a segmenty do výsledných sestav jehličkových ložisek, viz obr. 2.2.

3 NÁVRH INOVACE VÝROBNÍHO PROCESU

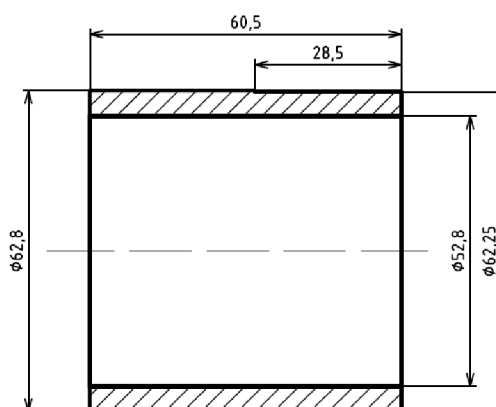
Následující kap. se zabývá návrhem inovace stávajícího výrobního procesu z hlediska třískového obrábění. Návrh se vztahuje ke vzorové součásti, viz kap. 2.6. V současné době výrobní proces zahrnuje technologii soustružení, následné tepelné zpracování a dokončovací broušení. Cílem této kapitoly je navrhnout a experimentálně otestovat podmínky pro soustružení již zakalených kroužků. Tímto návrhem by bylo možné z výrobního procesu vyloučit obecně nákladnou technologii broušení.

Experimentálně se ověří vliv jednotlivých rezných podmínek a rezných materiálů na jakost obráběného povrchu a zároveň vliv na zbytkovou povrchovou napjatost. Experiment byl proveden v podmínkách školní dílny FSI VUT v Brně, Ústavu strojírenské technologie.

3.1 Příprava vzorků

Pro experiment byl zvolen vzorový vnější kroužek jehličkového ložiska, viz kap. 2.6. Soustružen byl pouze vnější průměr $\phi 62,25$ mm. Délka soustružené plochy byla určena dle délky vzorového kroužku, který činí 25,1 mm a přídavku pro případné následné upíchnutí součásti na hodnotu 28,5 mm.

Vzhledem k možnostem upnutí vzorků do sklíčidla na zvoleném testovacím CNC soustruhu bylo použito upínání do sklíčidla za vnější průměr. Upnutí do sklíčidla za vnitřní průměr nebylo možné z důvodu velkého rozměru čelistí sklíčidla. Z toho důvodu bylo nutno také k délce soustružené plochy přidat přídavek na upnutí, který činil dle čelistí sklíčidla minimálně 30 mm. Výsledná délka testovacího kroužku byla zvolena na 60,5 mm.



Obr. 3.1 Náčrt obrobeneho vzorku.

Před provedením samotného experimentu bylo nutné zajistit potřebný materiál pro jeho realizaci. Pro praktické testování byl zaslán od firmy INA SKALICA spol. s r.o. potřebný

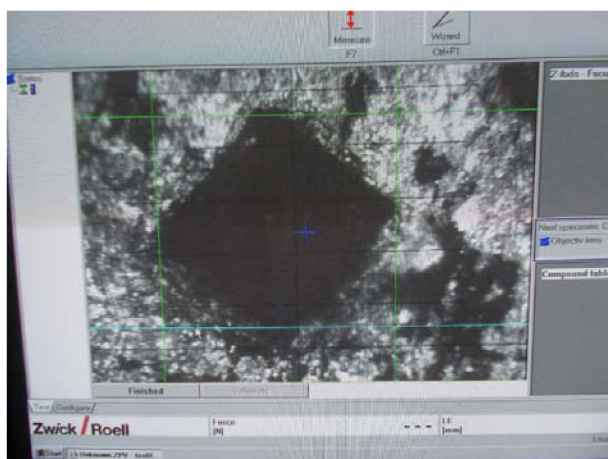
materiál ve formě bezešvých trubek vyrobených z materiálu 100Cr6, který je ve firmě nejpoužívanější.



Obr. 3.2 Materiál pro experiment od firmy INA SKALICA spol. s r.o.

Zasláno bylo šest trubek, viz obr. 3.2 (na obr. 3.2 je pouze pět) o vnějším průměru $\varnothing 62,8$ mm, vnitřním $\varnothing 52,8$ mm a délce 500 mm. Rozměry trubky odpovídají polotovaru pro vzorový vnější kroužek jehličkového ložiska, viz kapitola 2.6 s rozdílem ohledně délky trubky, ve firmě se využívají trubky o délce 2000 mm. Trubky byly nařezány z důvodu realizace doručení.

Pro realizaci dalšího zpracování materiálu bylo nutné zjistit, jak bude materiál nejlépe dělitelný, zda je nutné vzorky upichovat, či dělit na pile. Z toho důvodu se provedlo měření tvrdosti povrchu trubek. Měření se provedlo na měřicím zařízení ZWICK 3212, pracovní prostředí softwaru viz obr. 3.3.



Obr. 3.3 Pracovní prostředí softwaru pro zařízení ZWICK 3212.

Tab. 3.1 Tabulka naměřených hodnot tvrdosti dle Vickerse.

Číslo měření	Tvrдость podle Vickerse
1	147 HV
2	152 HV
3	160 HV

Pás nasazený na dílenskou pilu ve školní dílně má výrobcem stanovenou maximální tvrdost děleného materiálu 45 HRC. Z naměřených hodnot v tab. 3.1 tedy vyplývá, že je materiál dostatečně měkký a je možné ho dělit na dílenskou pilu. Pro dělení byla použita dílenská pásová pila od firmy Bomar STG220G, viz obr. 3.4.



Obr. 3.4 Dělení vzorků na dílenskou pásovou pilu Bomar STG220G.

Trubky se dělily na kroužky o délce 61,5 mm. Při započítání přířezu 2 mm na tloušťku pásu pily vychází na jednu bezešvou trubku o délce 500 mm 7 vzorků se zbytkem délky 55,5mm. Z počtu šesti trubek tedy bylo naděleno 42 ks vzorků.

Dále bylo nutné na vzorcích zarovnat čela a srazit hrany. K tomuto účelu byl využit klasický univerzální soustruh od výrobce TOS, typ SV18 RD, viz obr. 3.5. Soustružení bylo provedeno vyměnitelnou břitovou destičkou CNMG 120408 GC4225, upnutou do držáku pro vnější soustružení DCLNR 1616H12.



Obr. 3.5 Univerzální soustruh TOS SV18 RD.

Hodnota a_p byla nastavena pro zarovnávaní čel na hodnotu 0,5 mm. Vzhledem k přesnosti dílenské pily se tato hodnota u některých vzorků lišila. Úběr materiálu tedy na zarovnaní čel byl na každé straně 0,5 mm. Následně se pak srazily hrany na rozměr $1,5 \times 45^\circ$.



Obr. 3.6 42 ks vzorků připravených na tepelné zpracování.

Připravené vzorky z obr. 3.6 se dále nechaly tepelně zpracovat a to konkrétně zakalit a popustit. K provedení této operace nebylo v dílnách FSI vhodné zařízení, proto se operace prováděla u externí firmy. Jako vhodný zpracovatel byla vybrána firma METAL treatment s.r.o.

Firma provedla zakalení kroužků na požadovanou hodnotu 62 ± 2 HRC. Jako technologie pro kalení bylo zvoleno zahřátí kroužků na teplotu 840°C , následná výdrž 20 minut na teplotě a rychlé zchlazení do oleje. Popouštění probíhalo při teplotě 170°C a výdrži na teplotě po dobu 150 min., následné ochlazování probíhalo na vzduchu. Protokol o tepelném zpracování vystavený firmou METAL treatment s.r.o. viz příloha 3. Kontrola dosažené hodnoty tvrdosti viz tab. 3.2.

Tab. 3.2 Hodnoty kontrolního měření tvrdosti kalených vzorků.

	Vzorek číslo 20	Vzorek číslo 31
1. měření	60 HRC	59 HRC
2. měření	61 HRC	60 HRC
3. měření	59 HRC	61 HRC



Obr. 3.7 Kroužky po kalení a očíslování.

3.2 Návrh experimentu

Cílem experimentu je pomocí technologie soustružení dosáhnout takové kvality povrchu, aby bylo možné v technologickém postupu výroby vzorového kroužku odstranit technologii broušení. Předepsaná drsnost povrchu na výkrese vzorového vnějšího kroužku jehličkového ložiska má hodnotu $R_z = 1 \mu\text{m}$. Při převedení této hodnoty na hodnoty R_a , i přes fakt, že R_a a R_z nemají žádnou přímou závislost, se tato hodnota pohybuje přibližně mezi 0,15 až 0,25 μm .

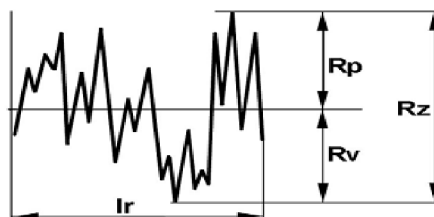
3.2.1 Teoretická drsnost povrchu

Drsnost povrchu je ukazatel kvality obrobenej plochy. Hodnota drsnosti je přímo závislá na několika činitelích. Jako jeden ze základních je použitá technologie obrábění, v obsahu experimentu se jedná technologii soustružení. Dále na obráběném materiálu, zvoleném obráběcím stroji a zvolených nástrojích pro obrábění. V neposlední řadě pak na řezných podmínkách obráběcího procesu [30, 31].

Drsnost je souhrn nerovností povrchu. Existuje několik základních charakteristických veličin drsnosti, např. R_a , R_z , R_m , R_y , atd., z nichž nejdůležitější jsou dvě a to R_a průměrná aritmetická úchylka profilu a R_z největší výška profilu, které nejlépe vyjadřují nerovnosti na povrchu. Hodnoty drsnosti se udávají v μm [30, 31].



Obr. 3.8 Profil obrobenej plochy se znázorněním Ra [31].



Obr. 3.9 Profil obrobenej plochy se znázorněním Rz [31].

Na obr. 3.9 je znázorněn profil obrobenej plochy s označením důležitých prvků. Prvek R_p , který je označením pro největší výšku výstupku profilu, R_v , který označuje největší hloubku prohlubně profilu a R_z , který je součtem R_p a R_v . l_r označuje relativní délku profilu, což je v podstatě délka, kterou měří měřicí přístroj. R_a viz obr. 3.10 je veličina definovaná jako aritmetický průměr všech odchylek od základního profilu [30, 31].

Teoretická hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu

Závislost pro teoretickou hodnotu průměrné aritmetické úchylky se specifikuje konkrétně pro případ dokončování. Pro určení vztahu pro soustružení se předpokládá, že je povrch tvořen obloukovou částí špičky nástroje [30, 31].

$$Ra_t = \frac{10^3 r_\epsilon^2 (2\alpha_A - \sin 2\alpha_A)}{f} \quad [\mu\text{m}] \quad (3.1)$$

Veličiny ze vztahu 3.1 jsou známé až na hodnotu úhlu α_A , kterou je nutno dopočítat [30, 31].

$$\alpha_A = \arccos \left[\frac{r_\epsilon}{f} \left(\arcsin \frac{f}{2r_\epsilon} + \frac{f}{4r_\epsilon^2} \sqrt{4r_\epsilon^2 - f^2} \right) \right] \quad [\text{rad}] \quad (3.2)$$

kde: Ra_t [μm] – teoretická hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu,
 r_ϵ [mm] – poloměr špičky nástroje,
 f [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$] – posuv na otáčku [30, 31].

Teoretická hodnota největší výšky profilu

Teoretická hodnota největší výšky profilu se vyjadřuje pro dva případy poloměru špičky nástroje, tj. pro $r_\varepsilon = 0$ mm, kde se jedná spíše o ideální případ a $r_\varepsilon > 0$ mm [30, 31].

Poloměr špičky $r_\varepsilon = 0$ mm:

Předpokládá se, že obrobený povrch je tvořen přímkovými částmi hlavního a vedlejšího ostří [30, 31].

$$Rz_t = f \cdot \frac{\sin \kappa_r \cdot \sin \kappa_r'}{\sin(\kappa_r + \kappa_r')} \cdot 10^3 \quad [\mu\text{m}] \quad (3.3)$$

kde: Rz_t [μm] – teoretická hodnota největší výšky profilu,
 f [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$] – posuv na otáčku,
 κ_r [$^\circ$] – úhel nastavení hlavního ostří,
 κ_r' [$^\circ$] – úhel nastavení vedlejšího ostří [30, 31].

Poloměr špičky $r_\varepsilon > 0$ mm:

Předpoklad při obrábění je, že se povrch tvoří reprodukcí obloukové části špičky nástroje, přímkové části hlavního a vedlejšího ostří na povrch nemají vliv [30, 31].

$$Rz_t = f(r_\varepsilon, f) = \left(r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - 0,25f^2} \right) \cdot 10^3 \quad [\mu\text{m}] \quad (3.4)$$

Vztah 3.4 slouží pro výpočet teoretické největší výšky profilu, ale pro praktické využití se používá jednodušší tvar.

$$Rz_t = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} \quad [\mu\text{m}] \quad (3.5)$$

kde: Rz_t [μm] – teoretická hodnota největší výšky profilu,
 f [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$] – posuv na otáčku,
 r_ε [mm] – poloměr špičky nástroje [30, 31].

3.2.2 Nástroje pro experiment

Při výběru vyměnitelných břitových destiček byl nutný předpoklad co nejlepšího výsledného obrobeného povrchu. Destičky byly vybrány od firmy SECO, ze sady destiček využitých v experimentu viz [32, 34, 35, 36, 37]. Experiment se zabýval soustružením kalených kroužků ložisek podobně jako tato práce. Všechny VBD v experimentu jsou

vhodné pro obrábění tvrdých materiálů, resp. materiálů s tvrdostí nad 56 HRC. Pro objektivitu měření byly vybrány 4 destičky, u kterých se předpokládá dobrá kvalita výsledného obrobeného povrchu, viz výsledky [32, 34, 35, 36, 37] a zároveň zastupují více technologií a řezných materiálů.

Tab. 3.3 Tabulka doporučených řezných podmínek pro VBD [33].

VBD	Doporučené hodnoty výrobcem		
	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm.ot ⁻¹]	a_p [mm]
CNMG 120408-MF1, TH1000	130 až 180	0,08 až 0,30	0,2 až 2,5
CNGA 120404 S01020 L1B CBN010	100 až 220	0,06 až 0,18	< 0,5
CNGA 120408 S01020 L1 WZB CBN010	100 až 220	0,06 až 0,18	< 0,5
CNGA 120408 S-L-1-WZP-B CBN060K	100 až 230	0,06 až 0,2	< 0,5

Z tab. 3.3 lze vyčíst, že první nástroj má poloměr zaoblení špičky 0,8 mm a je vyroben z materiálu TH1000, což je karbid typu H povlakovaný PVD s velmi tvrdou mikrostrukturou Ti-Al-Si-N. Další destička je již z kubického nitridu bóru CBN010, což je materiál s 50% obsahem cBN a keramickým pojivem TiC, destička má poloměr zaoblení špičky 0,4 mm. Třetí destička je také z materiálu CBN010, ale s poloměrem zaoblení špičky 0,8 mm a technologií Wiper. U poslední destičky se také jedná o kubický nitrid bóru, ale v tomto případě CBN60K, což je materiál s obsahem 50% cBN a keramickým pojivem TiC. Materiál je na rozdíl od CBN010 povlakován PVD povlakem Ti-Al-Si-N. Dále má destička poloměr zaoblení špičky 0,8 mm a taktéž se jedná o technologii Wiper [33].

Z hlediska velikosti mají všechny vybrané vyměnitelné břitové destičky stejný tvar i stejné rozměry. Díky tomu bylo možné využít jednoho držáku VBD. Byl využit držák od firmy Pramet Tools s.r.o. označen DCLN 2525 M12 1142KT, viz obr. 3.10.



Obr. 3.10 Držák VBD DCLN 2525 M12 1142KT.

3.2.3 Využitý stroj pro experiment

Pro následnou realizaci experimentu byl zvolen CNC soustruh od firmy KOVOSIT MAS, a.s. s označením SP 280 SY. Jedná se o CNC soustruh vybaven dvěma vřeteny a revolverovou hlavou pro nástroje. Soustruh byl zvolen jako stroj z vybavení školní dílny FSI VUT v Brně, Ústavu strojírenské technologie s předpokládanou největší tuhostí během obrábění ve srovnání se staršími konvenčními stroji z vybavení dílny.



Obr. 3.11 CNC soustruh SP 280 SY.

Tab. 3.4 Technické parametry CNC soustruhu SP 280 SY.

	SP 280 SY
Max. soustružený průměr	280 mm
Max. průměr tyčového polotovaru	61 mm
Max otáčky hl. vřetena/protivřetena	4700 / 6000 ot ⁻¹
Výkon hl. vřetena	20,9 / 27 kW
Výkon protivřetena	7,5 / 9 kW
Krouticí moment vřetena/protivřetena	257 / 57 N.m
Rychloposuv příčného suportu	30 m.min ⁻¹
Rychloposuv podélného suportu	30 m.min ⁻¹
Počet nástrojových pozic	12

3.2.4 Řezné podmínky pro provedení experimentu

K samotné realizaci experimentu bylo samozřejmě nutné navrhnout i řezné podmínky pro jednotlivé testy. Tyto podmínky byly navrženy s pomocí několika zdrojů, jako nejvýznamnější lze uvést již zmiňovaný experiment [32, 34, 35, 36, 37], dále pak doporučené hodnoty řezných podmínek obrábění pro jednotlivé řezné destičky viz výrobce, v závislosti na výpočtu teoretické drsnosti pro soustružení.

Tab. 3.5 Přehled řezných podmínek pro jednotlivé testy.

č. testu	VBD	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm.ot ⁻¹]	a_p [mm]	Počet vzorků	Rz_t [μm]
1	CNMG 120408-MF1, TH1000	150	0,08	0,138	5 ks	1,001
2		250	0,08	0,138	5 ks	1,001
3	CNGA 120404 S01020 LB1 CBN010	110	0,06	0,138	5 ks	1,127
4		300	0,06	0,138	5 ks	1,127
5	CNGA 120408 S01020 L1 WZB CBN010	110	0,06	0,138	5 ks	0,563
6		300	0,06	0,138	5 ks	0,563
7	CNGA 120408 S-L-1-WZP-B CBN060K	110	0,07	0,138	5 ks	0,766
8		250	0,07	0,138	5 ks	0,766

Výpočet teoretické největší výšky profilu Rz_t pro 1. test:

$$\begin{aligned} Rz_t &= f(r_\varepsilon, f) = \left(r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - 0,25f^2} \right) \cdot 10^3 = & (3.5) \\ &= \left(0,8 - \sqrt{0,8^2 - 0,25 \cdot 0,08^2} \right) \cdot 10^3 = 1,001 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Jak lze vidět v tab. 3.5, pro každou řeznou destičku se provedla dvě měření. U těchto dvou měření pro každou destičku se mění pouze hodnota řezné rychlosti, aby se experimentálně odzkoušel vliv řezné rychlosti na kvalitu obrobeneho povrchu. Pro každé měření se obrábělo 5 vzorků z důvodu statistického srovnání výsledků.

Dále se v tabulce nachází hodnota teoretické největší výšky profilu. Tato hodnota je zde uvedena jako orientační, hodnoty prakticky měřené na obrobenech vzorcích se mohou i výrazně lišit. Z vypočítaných výsledků lze uvést, že měření s předpokládanými nejlepšími výsledky jsou 5, 6, 7 a 8 kdy se hodnota Rz_t pohybuje pod hodnotou 1.

Obrábění se provádělo se dvěma úběry třísek s nastavenou konstantní hodnotou a_p . Dvojitý úběr byl nastaven z důvodu vymezení házivosti vzorku, která by mohla nepříznivě ovlivnit výsledky měřené povrchu. Hodnoty a_p tedy byly zvoleny v závislosti na průměru polotovaru vůči výslednému průměru a na odebrání dvou třísek. Hodnoty posuvu f byly oproti tomu zvoleny dle doporučených hodnot od výrobce VBD na nejnižší možnou hodnotu. Posuv byl takto zvolen, jelikož ze vztahu pro výpočet teoretické drsnosti vyplývá, že nižší hodnota posuvu příznivě ovlivňuje výslednou drsnost povrchu. Řezné rychlosti byly voleny pro každou VBD dvě, nejdříve nízká, kdy byla volena rychlost blízká nejnižší doporučené a pro druhé měření řezná rychlost vysoká, kdy se vcelku značně překročily doporučené hodnoty řezné rychlosti od výrobce.

3.3 Realizace obrábění

Obrábění bylo provedeno dle zadaného návrhu, viz kapitola 3.2. Obrábění bylo rozděleno na dvě části, kdy se první den nastavovala soustava S-N-O, a obrobily se vzorky pro první 4 měření a druhý den se obrobily vzorky pro zbylé měření 5 až 8. Při obrábění pak bylo zavedeno chlazení řezného procesu chladicí emulzí. Byl využit koncentrát řezné kapaliny mísený s vodou o obsahu 8 až 9 % oleje. Označení koncentrátu je CIMSTAR 597.



Obr. 3.12 Pohled do pracovního prostoru stroje během procesu obrábění.

Výsledkem obrábění je 40 obrobených vzorků. Během obrábění byly dva vzorky nahrazeny z důvodu mechanického poškození. Jako první byl poškozen vzorek číslo 1, viz obr. 3.13. Vzorek byl poškozen vyvozením příliš velké upínací síly čelistmi sklíčidla. Z tohoto důvodu byl vzorek vyřazen a nahrazen náhradním vzorkem. Z hlediska vyhodnocení tento vzorek nemá větší význam, jelikož k jeho poškození došlo čistě hrubým mechanickým poškozením.



Obr. 3.13 Vyřazený vzorek číslo 1 mechanicky poškozen čelistmi sklíčidla.

Druhý poškozený byl vzorek číslo 32, u kterého vznikla prasklina v obráběné části během procesu obrábění. Vzorek byl vyřazen a nahrazen, ale vzorek s prasklinou bude dále vyhodnocen v dalších kapitolách.

3.4 Vyhodnocení naměřených hodnot

Jako hlavní měřená veličina byla drsnost povrchu obrobených vzorků. Další neméně důležitá měřená veličina byl Barkhausenův šum, který vyjadřuje ve své hodnotě nespojitost změny magnetizace při spojitě změně budícího magnetického pole. V praktickém použití hodnota Barkhausenova šumu závisí na několika činitelích, které na ni mají už přímý

nebo nepřímý vliv. Jako nejvýznamnější jsou integrita povrchu, zbytkové napětí pod povrchem a vliv změny mikrostruktur v povrchových vrstvách měřené plochy [27].

Pro vyhodnocení experimentu byly použity čtyři měřicí přístroje, z toho tři pro měření parametrů drsnosti povrchu. Jako první lze uvést ruční drsnoměr TR100. Výsledky z tohoto použitého přístroje nejsou dostatečně přesné, tudíž měření bylo provedeno pouze z orientačního hlediska.



Obr. 3.14 Ruční drsnoměr TS100.

Další použité měřicí zařízení byl TaylorHobson. Toto měřicí zařízení je výrazně přesnější než předešlé ruční měřidlo. Stejně jako u předešlého přístroje se jedná o kontaktní metodu měření. U obou přístrojů byla provedena 3 měření pro minimalizaci náhodných chyb měření. Z hlediska vyhodnocení se předpokládají naměřené hodnoty tímto přístrojem za nejpřesnější ze všech použitých měřidel.



Obr. 3.15 Měření metodou TaylorHobson.

Jako poslední zařízení pro měření parametrů drsnosti povrchu byl zvolen přístroj Alicona. Jedná se o zařízení pro měření struktury povrchu bezkontaktní metodou. Pro měření tímto přístrojem byl z každého testu o pěti vzorcích vybrán jeden, na kterém se následně provedlo měření. Výsledky z tohoto přístroje jsou zkráceny, jelikož samotné zaměření mikroskopu na měřený povrch bylo problematické. Důvod byl v odlesku měřených ploch,

kdy nebylo v některých případech vůbec možné zaostřit a povedlo se zaostřit pouze úzký pás měřené plochy.

Výsledky měření pro 1. test

Tab. 3.6 Tabulka naměřených hodnot pro 1. testování.

číslo vzorku	TS100	TaylorHopson		Alicona
	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
				Rz [μm]
1	0,33	0,1352	0,9140	
	0,28	0,1371	0,9275	
	0,21	0,1391	0,9079	
2	0,17	0,1410	1,0171	1,72 12,4972
	0,26	0,1384	0,9444	
	0,18	0,1345	0,9698	
3	0,20	0,1582	1,1644	
	0,34	0,1534	1,1380	
	0,28	0,1575	1,1730	
4	0,27	0,1764	1,2571	
	0,35	0,1745	1,1474	
	0,30	0,1782	1,1709	
5	0,25	0,2339	1,3266	
	0,25	0,2091	1,2001	
	0,30	0,2071	1,2380	

První testování bylo provedeno s VBD CNMG 120408-MF1, TH1000 za řezných podmínek $a_p = 0,138 \text{ mm}$, $f = 0,08 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, a $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Teoretická největší výška profilu byla spočítána na hodnotu $Rz_t = 1,001 \mu\text{m}$ a při porovnání s naměřenými hodnotami metodou TaylorHobson se hodnoty z praktického měření příliš neliší.

Tříska odcházející během obrábění byla krátká, šroubovitého tvaru viz obr. 3.16. Během obrábění všech pěti vzorků odcházela tříska tohoto typu.



Obr. 3.16 Tříska vzniklá při obrábění vzorku číslo 2.

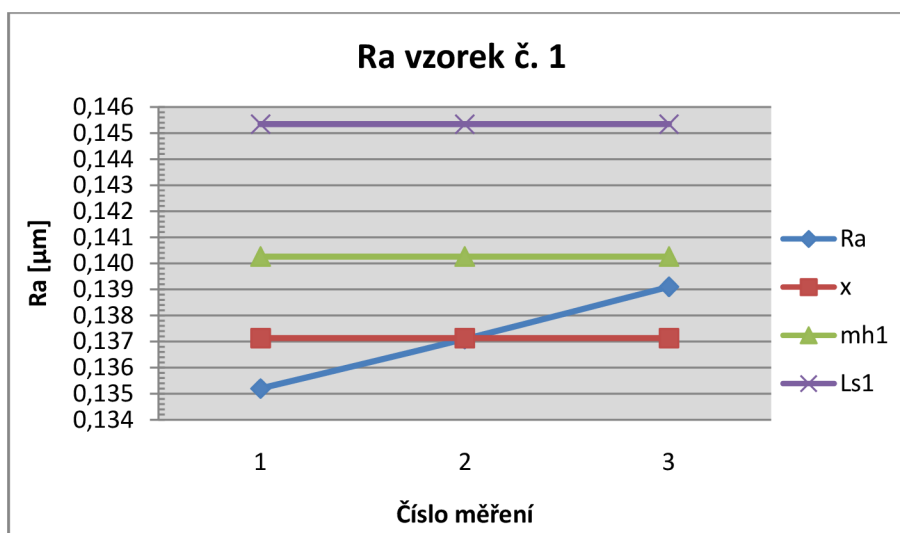
Při porovnání naměřených hodnot parametrů drsnosti lze pozorovat postupnou zhoršující se drsnost povrchu. Nejpravděpodobnější příčina je zvětšující se opotřebení ostří vyměnitelné břitové destičky během obrábění jednotlivých vzorků, nebo tvorba nárůstku na špičce nástroje.

V tab. 3.7 jsou hodnoty statistického vyhodnocení testování číslo 1. U naměřených hodnot Ra a Rz se předpokládá spojitý náhodný charakter a normální rozdělení. Z naměřených hodnot $n = 3$ byl stanoven odhad střední hodnoty \bar{x} , odhad směrodatné odchylky s , konfidencí mez m_{h1} a statistická mez L_{s1} . Pro všechny statistické hodnocení byly stanoveny hodnoty $t_{1-\alpha/2, n-1} = 2,776$ pro výpočet jednostranného konfidenčního intervalu a $k_{1(n,p,1-\alpha)} = 4,28$ pro výpočet jednostranného statistického tolerančního intervalu.

Tab. 3.7 Statistické hodnocení naměřených hodnot.

č. vzorku		\bar{x}	s	m_{h1}	L_{s1}
1	Ra [μm]	0,1371	0,00195	0,14025	0,14534
	Rz [μm]	0,9165	0,01003	0,93254	0,95869
2	Ra [μm]	0,1379	0,00327	0,14321	0,15174
	Rz [μm]	0,9771	0,03689	1,03623	1,13243
3	Ra [μm]	0,1564	0,00259	0,16052	0,16728
	Rz [μm]	1,1585	0,18239	1,18769	1,23525
4	Ra [μm]	0,1764	0,00185	0,17933	0,18415
	Rz [μm]	1,1918	0,05776	1,28437	1,43496
5	Ra [μm]	0,2167	0,01493	0,24062	0,27955
	Rz [μm]	1,2549	0,06492	1,35895	1,52822

Statistické veličiny byly zpracovány pro vybrané vzorky v jednotlivých testech i graficky. Pro testování číslo 1 byl vybrán první vzorek, který je graficky zpracován na obr. 3.17 a 3.18. Grafické zpracování dalších vybraných vzorků z jednotlivých testování viz příloha 6.

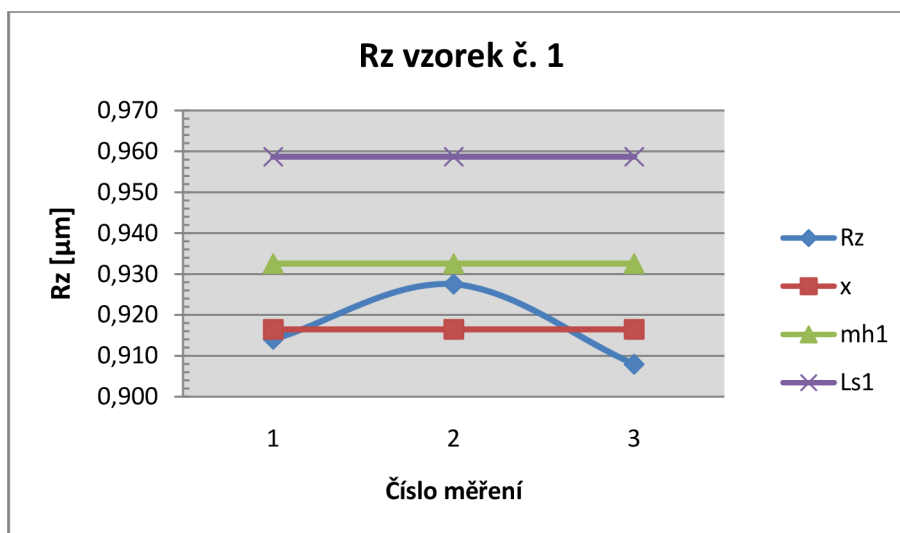


Obr. 3.17 Grafická závislost statistického vyhodnocení Ra vzorku č.1.

Jednotlivé hodnoty Ra nemají příliš velký rozptyl, odhad směrodatné odchylky činí 0,00195. Tato hodnota se dá označit za velmi nízkou. Odhad směrodatné odchylky pro hodnoty Rz tohoto vzorku je 0,01003, což také velmi nízká hodnota. Hodnoty Ra dosahují

až téměř hodnoty $R_a = 0,135 \mu\text{m}$, nicméně konfidencí interval je $0,14025$. U hodnocení R_z je to podobné, R_z dosahují nejnižší hodnoty pod $0,91$, ale konfidencí interval je $0,93254$.

Při srovnání průběhů hodnot R_a a R_z je zřejmé, že se liší, zatímco třetí naměřená hodnota R_a je vyšší než ostatní, tak třetí hodnota R_z je paradoxně ze všech měřených nejnižší. Tato skutečnost dokazuje, že R_a a R_z mezi sebou nemají žádnou přímou závislost, i když jsou obě hodnoty parametry drsnosti povrchu.



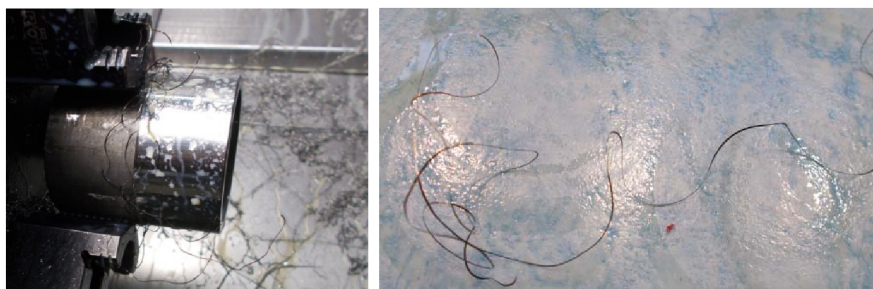
Obr. 3.18 Grafická závislost statistického vyhodnocení R_z vzorku č. 1.

Výsledky měření pro 2. test

Tab. 3.8 Tabulka naměřených hodnot pro 2. testování.

číslo vzorku	TS100		TaylorHopson		Alicona
	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
6	0,33	0,2896	1,3949		
	0,35	0,2768	1,3921		
	0,32	0,2965	1,4148		
7	0,35	0,3287	1,6027	1,2586	
	0,39	0,3254	1,5004	10,2516	
	0,35	0,2990	1,4040		
8	0,37	0,3413	1,5466		
	0,35	0,3346	1,4812		
	0,36	0,3321	1,4813		
9	0,91	0,8744	3,3424	1,2927	
	0,91	0,8597	3,3348	9,0897	
	0,91	0,8189	3,1835		
10	0,31	0,1815	1,1680		
	0,27	0,2707	1,5504		
	0,24	0,1805	1,1375		

Druhé testování se oproti předešlému lišilo pouze v nastavení řezné rychlosti, která v tomto případě byla $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$. Při srovnání naměřených hodnot lze pozorovat, že naměřené výsledky jsou oproti předešlému testu horší. Jako anomálie měření je vzorek číslo 9, u kterého došlo k namotání třísky na obrobek a k poškození obráběné plochy. Další anomálii během měření je skutečnost, že následující vzorek číslo 10 má lepší výsledky než vzorky číslo 6 až 8. Jako příčina se nabízí tvorba nárustku, který se při obrábění vzorku číslo 9 vlivem změny řezných sil oddělil.



Obr. 3.19 Vzorek číslo 9 s namotanou třískou a fotografie odebrané třísky.

Tab. 3.9 Statistické hodnocení naměřených hodnot.

č. vzorku		\bar{x}	s	m_{h1}	L_{s1}
6	Ra [μm]	0,2876	0,00999	0,30365	0,32972
	Rz [μm]	1,4006	0,01237	1,42043	1,45271
7	Ra [μm]	0,3177	0,01628	0,34379	0,38623
	Rz [μm]	1,5024	0,09936	1,66162	1,92069
8	Ra [μm]	0,3360	0,00475	0,34362	0,35603
	Rz [μm]	1,5030	0,03773	1,56350	1,66188
9	Ra [μm]	0,8510	0,02875	0,89709	0,97205
	Rz [μm]	3,2869	0,08962	3,43054	3,66423
10	Ra [μm]	0,2109	0,05179	0,29391	0,42893
	Rz [μm]	1,2853	0,23008	1,65407	2,25397

Statistické hodnocení potvrzuje již zmíněné zhoršení výsledků oproti předešlému testování. Dále odhad směrodatné odchylky opět ukazuje velmi malý rozptyl měřených hodnot a s výjimkou posledního vzorku se její hodnota pohybuje v setinách.

Výsledky měření pro 3. test

Tab. 3.10 Tabulka naměřených hodnot pro 3. testování.

číslo vzorku	TS100	Taylor/Hopson		Alicona
	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
				Rz [μm]
11	0,59	0,2360	1,4117	
	0,29	0,2552	1,5189	
	0,32	0,2608	1,5020	
12	0,37	0,3401	1,8449	1,3628 10,3008
	0,35	0,3349	1,9151	
	0,36	0,3364	1,8633	
13	0,63	0,4169	2,2070	
	0,56	0,4145	2,2538	
	0,44	0,4220	2,2949	
14	0,46	0,4480	2,2942	
	0,47	0,4491	2,2804	
	0,48	0,4528	2,3477	
15	0,58	0,5620	2,3576	
	0,59	0,5556	2,3492	
	0,60	0,5535	2,3721	

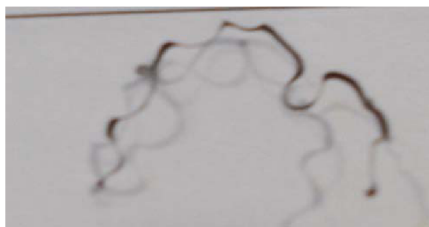
Testování číslo 3 se provedlo s testovanou vyměnitelnou břitovou destičkou CNGA 120404 S01020 L1B CBN010. Obrábění bylo provedeno za řezných podmínek $a_p = 0,138 \text{ mm}$, $f = 0,06 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, a $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Teoretická největší výška profilu byla spočtena na hodnotu $Rz_t = 1,127 \mu\text{m}$. Při srovnání naměřených hodnot se spočteným Rz_t jde vidět vyšší hodnoty oproti teoretickým. Obecně při testování této VBD byly předpokládány horší výsledky a to již z důvodu mírného opotřebení břitu nástroje před obráběním, viz obr. 3.20.



Obr. 3.20 VBD CNGA 120404 S01020 L1B CBN010 před provedením experimentu.

Na obrázku výše je znázorněna testovaná VBD před provedením experimentu s označením použité strany VBD. Její mírné opotřebení pravděpodobně mělo negativní vliv na výslednou drsnost obráběného povrchu.

Tříska odcházející při tomto testování odcházela krátká zbarvená do fialova, viz obr. 3.21. Během obrábění dalších vzorků se tříska neměnila.



Obr. 3.21 Odebraná tříska během obrábění vzorku číslo 12.

Tab. 3.11 Statistické hodnocení naměřených hodnot.

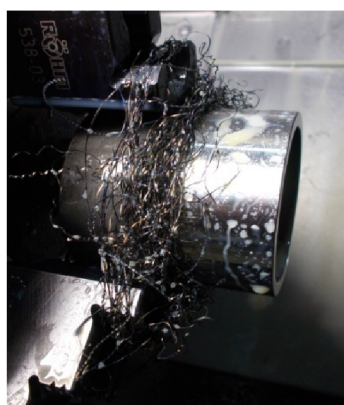
č. vzorku		x	s	m _{h1}	L _{s1}
11	Ra [μm]	0,2507	0,01301	0,27151	0,30543
	Rz [μm]	1,4775	0,05763	1,56991	1,72018
12	Ra [μm]	0,3371	0,00267	0,34142	0,34840
	Rz [μm]	1,8744	0,03640	1,93277	2,02768
13	Ra [μm]	0,4178	0,00383	0,42394	0,43393
	Rz [μm]	2,2519	0,04398	2,32239	2,43705
14	Ra [μm]	0,4499	0,00251	0,45399	0,46055
	Rz [μm]	2,3074	0,35548	2,36441	2,45709
15	Ra [μm]	0,5570	0,00443	0,56413	0,57567
	Rz [μm]	2,3596	0,01159	2,37820	2,40841

Výsledky měření pro 4. test

Tab. 3.12 Tabulka naměřených hodnot pro 4. testování.

číslo vzorku	TS100	Taylor/Hopson		Alicona
	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
				Rz [μm]
16	0,52	0,4857	2,0750	
	0,51	0,4972	2,1366	
	0,51	0,4941	2,1873	
17	0,49	0,4254	2,0355	1,0768 6,9979
	0,48	0,4305	2,0655	
	0,50	0,4281	2,0316	
18	0,33	0,3144	1,4802	
	0,33	0,3104	1,5128	
	0,33	0,3062	1,4884	
19	0,32	0,2540	1,3183	
	0,33	0,2603	1,3077	
	0,34	0,2777	1,3006	
20	0,39	0,2855	1,5578	
	0,32	0,2860	1,5019	
	0,33	0,2841	1,5039	

Oproti testování číslo 3 se 4. test liší pouze řeznou rychlostí, která v tomto případě byla stanovena na $v_c = 300 \text{ m.min}^{-1}$. Při porovnání výsledků měření dle TaylorHobsona lze konstatovat, že zvýšení řezné rychlosti mělo na výslednou drsnost obrobeneho povrchu jen malý vliv. Hodnoty R_z se u prvních vzorků pohybují kolem $2 \mu\text{m}$, ale u vzorku číslo 18 nastává výraznější zlepšení. Jako příčině se opět nabízí oddělení nárůstku od špičky VBD a tudíž k návratu k původní geometrii břitů nástroje s rozdílem způsobeným opotřebením. Dále při obrábění vzorku číslo 19 došlo k namotání třísky na obrobek, což překvapivě nemělo negativní vliv na drsnost povrchu a naopak je výsledná drsnost z měřených vzorků nejlepší.



Obr. 3.22 Namotaná tříska na vzorku číslo 19.

Během obrábění této série se tvořila tříska dlouhá stočená do šroubovitého tvaru. Barva třísky byla do fialova. Tříska z obrábění vzorku číslo 18 nebyla odebrána, ale dalo by se předpokládat, že se bude lišit a spíše se podobat tříске odebrané ze vzorku číslo 19, která se tvořila dlouhá, nepravidelně šroubovitá a zabarvená také do fialova.



a) tříska vzorek číslo 17



b) tříska vzorek číslo 19

Obr. 3.23 Třísky odebrané během obrábění vzorků číslo 16 až 20.

Tab. 3.13 Statistické hodnocení naměřených hodnot.

č. vzorku		x	s	m _{h1}	L _{s1}
16	Ra [μm]	0,4923	0,00595	0,50187	0,51738
	Rz [μm]	2,1329	0,05623	2,22310	2,36973
17	Ra [μm]	0,4280	0,00255	0,43208	0,43874
	Rz [μm]	2,0442	0,01855	2,07393	2,12229
18	Ra [μm]	0,3103	0,00410	0,31690	0,32759
	Rz [μm]	1,4938	0,01695	1,52097	1,56519
19	Ra [μm]	0,2640	0,01227	0,28367	0,31568
	Rz [μm]	1,3089	0,00890	1,32314	1,34636
20	Ra [μm]	0,2852	0,00099	0,28677	0,28935
	Rz [μm]	1,5212	0,03171	1,57202	1,65471

Výsledky měření pro 5. test

Tab. 3.14 Tabulka naměřených hodnot pro 5. testování.

číslo vzorku	TS100	Taylor/Hopson		Alicona
	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
				Rz [μm]
21	0,18	0,0515	0,3183	
	0,25	0,0621	0,3774	
	0,16	0,0491	0,3063	
22	0,17	0,0839	0,4632	1,072 7,6700
	0,18	0,0947	0,5006	
	0,15	0,0943	0,4721	
23	0,21	0,2107	0,9962	
	0,20	0,1963	0,9410	
	0,20	0,2167	0,9754	
24	0,12	0,1477	0,7092	
	0,14	0,1000	0,5471	
	0,14	0,1262	0,6412	
25	0,21	0,1658	0,8772	
	0,19	0,1649	0,8540	
	0,20	0,1660	0,8434	

Testování číslo 5 se provedlo s testovanou vyměnitelnou břitovou destičkou CNGA 120408 S01020 L1 WZB CBN010. Obrábění bylo provedeno za řezných podmínek $a_p = 0,138$ mm, $f = 0,06$ mm.ot⁻¹, a $v_c = 110$ m.min⁻¹. Teoretická největší výška profilu byla spočtena na hodnotu $Rz_t = 0,563$ μm. Při srovnání teoretických hodnot Rz_t s hodnotami naměřenými dle TaylorHobsona, lze pozorovat, že se hodnoty průměrně přibližně drží spočtené teoretické hodnoty. Vzorek číslo 21 má dokonce výrazně lepší naměřené hodnoty. Obecně při srovnání výsledků z 5. testování s předešlými výsledky, je zde výrazné zlepšení drsnosti obráběného povrchu. Toto zlepšení lze přičíst použití VBD s technologií Wiper. Technologie vyvinutá za účelem zlepšení jakosti výsledného povrchu má speciální geometrii břitu, díky které nástroj zahlazuje výstupky vzniklé projetím špičky nástroje a tím obrobenu plochu vyhlazuje.

Tříška vznikající během procesu obrábění byla značně dlouhá a stočená do šroubovitého tvaru. Barva třísky byla stříbrná v barvě kovu, čili nedošlo k jejímu spálení. Následně během obrábění nedošlo k žádným anomáliím a tříška byla u všech vzorků stejná.



Obr. 3.24 Tříška odebraná během obrábění vzorku 21.

Tab. 3.15 Statistické hodnocení naměřených hodnot.

č. vzorku		x	s	m_{h1}	L_{s1}
21	Ra [μm]	0,0542	0,00692	0,06532	0,08335
	Rz [μm]	0,3340	0,03806	0,39500	0,49424
22	Ra [μm]	0,0909	0,00612	0,10078	0,11674
	Rz [μm]	0,4786	0,01953	0,50994	0,56088
23	Ra [μm]	0,2079	0,01048	0,22470	0,25204
	Rz [μm]	0,9708	0,02787	1,01554	1,08823
24	Ra [μm]	0,1246	0,02388	0,16292	0,22520
	Rz [μm]	0,6325	0,08139	0,76296	0,97519
25	Ra [μm]	0,1655	0,00058	0,16650	0,16803
	Rz [μm]	0,8582	0,01728	0,88590	0,93098

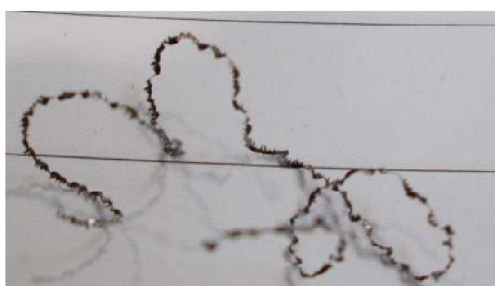
Výsledky měření pro 6. test

Tab. 3.16 Tabulka naměřených hodnot pro 6. testování.

číslo vzorku	TS100	Taylor/Hopson		Alicona
	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
				Rz [μm]
26	0,26	0,1525	0,7232	
	0,20	0,1656	0,7767	
	0,18	0,1657	0,7708	
27	0,24	0,1976	1,0659	0,333 2,1155
	0,26	0,1926	1,0499	
	0,20	0,1709	0,8664	
28	0,21	0,1570	0,7595	
	0,20	0,1698	0,8265	
	0,20	0,1619	0,8649	
29	0,22	0,1739	0,9935	
	0,22	0,1742	0,9681	
	0,23	0,1716	0,9526	
30	0,21	0,1749	0,9637	
	0,22	0,1805	1,0119	
	0,24	0,1752	1,0045	

Podobně jako při předešlých testováních se tato série liší pouze řeznou rychlostí stanovenou na hodnotu $v_c = 300 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Při této rychlosti lze z výsledků pozorovat jisté zhoršení měřených hodnot. Z toho vyplývá, že zvýšení řezné rychlosti mělo v tomto případě negativní vliv na drsnost obrobenej plochy. V porovnání však s předešlými testy jsou hodnoty naměřené po obrábění technologií Wiper stále lepší než s klasickou geometrií břitu.

Tříška odebraná při obrábění byla delší, nepravidelně stočená a na krajích roztřepeaná, ale při kontaktu se měla tendence drolit na malé segmenty. Barva třísky byla modrofialová, s čehož lze usuzovat, že došlo k značnému teplotnímu ovlivnění, a tudíž s třískou odcházelo velké množství vzniklého tepla.



Obr. 3.25 Tříška odebraná během obrábění vzorku 27.

Tab. 3.17 Statistické hodnocení naměřených hodnot.

č. vzorku		x	s	m_{h1}	L_{s1}
26	Ra [μm]	0,1612	0,00759	0,17343	0,19323
	Rz [μm]	0,7569	0,02933	0,80391	0,88039
27	Ra [μm]	0,1870	0,01419	0,20978	0,24678
	Rz [μm]	0,9940	0,11085	1,17173	1,46075
28	Ra [μm]	0,1629	0,00645	0,17325	0,19009
	Rz [μm]	0,8169	0,05334	0,90246	1,04154
29	Ra [μm]	0,1732	0,00142	0,17551	0,17922
	Rz [μm]	0,9714	0,02064	1,00449	1,05833
30	Ra [μm]	0,1768	0,00315	0,18191	0,19013
	Rz [μm]	0,9933	0,02595	1,03497	1,10265

Výsledky měření pro 7. test

Tab. 3.18 Tabulka naměřených hodnot pro 7. testování.

číslo vzorku	TS100	Taylor/Hopson		Alicona
	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
				Rz [μm]
31	0,11	0,0582	0,3366	
	0,19	0,0671	0,3801	
	0,19	0,0572	0,3382	
32	0,18	0,0529	0,2774	0,828 6,6583
	0,18	0,0650	0,3539	
	0,21	0,0531	0,2742	
33	0,12	0,0647	0,3294	
	0,15	0,0635	0,3152	
	0,12	0,0568	0,3193	
34	0,17	0,0659	0,3403	
	0,10	0,0690	0,3637	
	0,13	0,0711	0,3617	
35	0,20	0,0511	0,4911	
	0,15	0,0682	0,3789	
	0,16	0,0877	0,4632	

K provedení testu číslo 4 byla použita poslední z testovaných destiček a to CNGA 120408 S-L-1-WZP-B CBN060K. Podobně jako u předešlé VBD se jedná o destičku s technologií Wiper, ale na rozdíl od předešlé je destička povlakována PVD povlakem Ti-Al-Si-N. Pro testování byly použity následující řezné podmínky $a_p = 0,138 \text{ mm}$, $f = 0,07 \text{ mm.ot}^{-1}$, a $v_c = 110 \text{ m.min}^{-1}$, spočtená hodnota $Rz_t = 0,766 \mu\text{m}$. Při srovnání teoretické hodnoty Rz_t z hodnotami naměřenými je vidět výrazný rozdíl, kdy naměřené hodnoty jsou daleko lepší než hodnota spočtená. Ohledně srovnání všech testování se jedná hodnoty nejlepší. Příčina těchto výsledků se nabízí jako spojení technologie Wiper a materiálu CBN060k s povlakem.

Během obrábění se tvořila velmi dlouhá tříska stočená do šroubovitého tvaru ve stříbrné barvě kovu, takže bez výrazného tepelného ovlivnění.



Obr. 3.26 Tříska odebraná během obrábění vzorku 31.

Tab. 3.19 Statistické hodnocení naměřených hodnot.

č. vzorku		x	s	m _{hl}	L _{s1}
31	Ra [μm]	0,0608	0,00545	0,06956	0,08378
	Rz [μm]	0,3516	0,02466	0,39116	0,45548
32	Ra [μm]	0,0570	0,00693	0,06811	0,08617
	Rz [μm]	0,3018	0,04511	0,37125	0,49179
33	Ra [μm]	0,0616	0,00426	0,06849	0,07959
	Rz [μm]	0,3213	0,00731	0,33301	0,35206
34	Ra [μm]	0,0686	0,00261	0,07286	0,07968
	Rz [μm]	0,3552	0,01297	0,37602	0,40985
35	Ra [μm]	0,0690	0,01831	0,09835	0,14069
	Rz [μm]	0,4444	0,05842	0,53802	0,69032

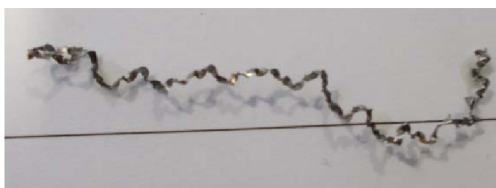
Výsledky měření pro 8. test

Tab. 3.20 Tabulka naměřených hodnot pro 8. testování.

číslo vzorku	TS100	Taylor/Hopson		Alicona
	Ra [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
				Rz [μm]
36	0,20	0,0608	0,3450	
	0,14	0,0624	0,3668	
	0,17	0,0602	0,4044	
37	0,12	0,0689	0,5013	0,209 1,6643
	0,15	0,0699	0,5162	
	0,13	0,0686	0,5259	
38	0,17	0,0615	0,3548	
	0,23	0,0644	0,3746	
	0,15	0,0630	0,3405	
39	0,18	0,0641	0,3445	
	0,11	0,0654	0,3548	
	0,23	0,0639	0,3197	
40	0,12	0,0560	0,3317	
	0,17	0,0502	0,3329	
	0,12	0,0542	0,3489	

Pro poslední 8. Test byly použity stejné řezné podmínky a stejný nástroj jako v předešlém testu, s výjimkou řezné rychlosti, která byla stanovena na $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Při srovnání naměřených hodnot metodou TaylorHobson s testem číslo 7, lze konstatovat, že zvýšení řezné rychlosti nemělo příliš vliv na výsledné hodnoty parametrů drsnosti povrchu. Stejně tedy jako v předešlém testu se jedná o nejlepší hodnoty z testování.

Tříška odebraná během tohoto obrábění byla kratší, nepravidelně stočená do šroubovitého tvaru a na krajích roztřepená podobně jako v případě testu číslo 6, ale zbarvení měla stříbrně fialové a neměla tendence se rozpadat na segmenty.



Obr. 3.27 Tříška odebraná během obrábění vzorku 37.

Tab. 3.21 Statistické hodnocení naměřených hodnot.

č. vzorku		x	s	m _{hl}	L _{s1}
36	Ra [μm]	0,0611	0,00113	0,06295	0,06592
	Rz [μm]	0,3720	0,03005	0,42022	0,49857
37	Ra [μm]	0,0691	0,00068	0,07022	0,07199
	Rz [μm]	0,5144	0,01239	0,53432	0,56663
38	Ra [μm]	0,0629	0,00145	0,06529	0,06907
	Rz [μm]	0,3566	0,01712	0,38407	0,42872
39	Ra [μm]	0,0644	0,00081	0,06577	0,06786
	Rz [μm]	0,3396	0,01804	0,36858	0,41563
40	Ra [μm]	0,0534	0,00297	0,05822	0,06596
	Rz [μm]	0,3378	0,00960	0,35322	0,37826

Z hlediska celkového hodnocení naměřených hodnot parametrů drsnosti naměřených metodou TaylorHobson lze vyvodit, že vzhledem ke zvolenému vzorovému vnějšímu kroužku jehličkového ložiska lze využít destičky a všechny zvolené řezné podmínky pro testy 5, 6, 7 a 8. U všech těchto testů se hodnota Rz pohybuje pod hodnotou 1 μm, popřípadě přímo na této hodnotě. Z toho důvodu lze tyto podmínky aplikovat na vzorový kroužek, který má předepsanou nejvyšší výšku profilu Rz = 1 μm.

Z hlediska statistického hodnocení, viz tab. 3.7, 3.9, 3.11, 3.13, 3.14, 3.15, 3.17, 3.19, 3.21, ze stanovených hodnot vyplývá, že až na některé výjimky se naměřené hodnoty pohybují ve velmi malém rozmezí. Hodnoty odhadu směrodatné odchylky se ve všech testováních pohybují v řádech setin, někdy až tisícín. Díky tomu se také odhady konfidenčních intervalů blíží odhadům středních hodnot pro jednotlivé vzorky. S těmito skutečnostmi lze vyvodit, že až na pár výjimek mají všechny vzorky stálou drsnost povrchu po celé obrobené ploše.

3.5 Vyhodnocení naměřených hodnot Barkhausenova šumu

Pro naměření parametrů Barkhausenova šumu byl použit přístroj Rollscan 300, který je součástí vybavení firmy ZKL Brno, a. s. Měření bylo provedeno v prostorách právě již zmiňované firmy. Pro vlastní vyhodnocení byl měřen tzv. magnetoelastický parametr M_p podle Barkhausena. Tento parametr vyjadřuje poměrové rozdíly ve zbytkovém povrchovém napětí [27].



Obr. 3.28 Přístroj pro měření Barkhausenova šumu Rollscan 300.

Tento přístroj je nutno před vlastním měřením vzorků kalibrovat pro měření daného parametru. Pro měření vzorků byl přístroj nastaven na měření magnetoelastického parametru. Přístroj pracuje na principu snímání odezvy budících magnetických impulzů a snímanou odezvu měří v mV. Při překročení hodnoty $M_p = 50$ mV má testovaný povrch příliš vysoké povrchové napětí a při zatížení testované součásti hrozí havárie, resp. hrozí nebezpečí vzniku povrchových lomů [27].

Tab. 3.22 Naměřené hodnoty Barkhausenova šumu.

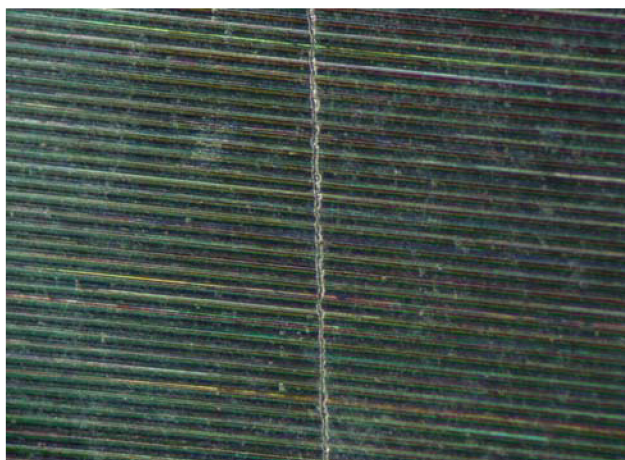
číslo vzorku	Barkhausenův šum								
	neobrobený povrh		obrobený povrh		číslo vzorku	neobrobený povrh		obrobený povrh	
	Mp [mV]	Mp [mV]	Mp [mV]	Mp [mV]		Mp [mV]	Mp [mV]	Mp [mV]	Mp [mV]
1	246	192	139	133	21	215	221	223	326
2	186	220	139	122	22	190	206	324	259
3	190	318	148	146	23	239	182	256	267
4	171	240	174	187	24	189	219	230	334
5	218	202	185	174	25	219	281	166	294
6	250	204	210	213	26	166	220	101	86
7	197	237	210	230	27			50	70
8	240	207	260	220	28	196	235	86	68
9	220	203	105	113	29	198	256	70	78
10	212	217	70	50	30	208	269	62	81
11	204	233	131	115	31	305	188	158	186
12	193	198	159	149	32	206	221	128	119
13	204	195	135	179	33	190	194	160	152
14	240	190	148	135	34	191	234	130	152
15	240	224	178	120	35	196	216	328	233
16	198	181	128	126	36	213	195	62	65
17	205	211	76	75	37			60	51
18	233	232	60	78	38	240	190	98	49
19	247	254	55	63	39	203	238	81	48
20	252	197	90	120	40	233	177	55	69

V tab. 3.22 je soubor všech naměřených hodnot M_p podle Barkhausena. Z podmínky, která je kalibrována na stroji, resp. že magnetoelastický parametr nesmí přesáhnout hodnotu $M_p = 50$ mV, vyplývá, že ani jeden z měřených vzorků tuto podmínku nesplňuje. Výsledky pro celé měření jsou tedy dosti negativní, jelikož ani jeden z měřených vzorků by nebylo vhodné v praxi používat. Nejnižší hodnoty, které se alespoň blíží k hodnotě $M_p = 50$ mV jsou vzorky 36 až 40, které byly obráběny jako test číslo 8.

Vysoké hodnoty naměřené u jednotlivých vzorků mohou mít hned několik příčin. Jednou z možných příčin je malá tloušťka stěny obráběného kroužku. Další z možností je provedené tepelné zpracování, které mohlo způsobit vysoké napětí ve vzorcích.

Při porovnání jednotlivých vzorků je zřejmé, že řezná rychlost má přímý vliv na povrchové napětí vzorku. S jedinou výjimkou jsou u vzorků obráběných vyšší rychlostí výsledky měření M_p výrazně nižší. Jediná výjimka jsou vzorky číslo 1 až 10, kdy při obrábění řeznou rychlostí $v_c = 250$ m.min⁻¹ je magnetoelastický parametr vyšší než u obrábění řeznou rychlostí $v_c = 150$ m.min⁻¹.

3.6 Vyhodnocení nahrazeného vzorku 32



Obr. 3.28 Detail praskliny vzniklé při obrábění vzorku číslo 32.

Na obr. 3.28 je detailní zobrazení praskliny a jejího směru vůči směru obrábění. Tato prasklina vznikla během obrábění vzorku číslo 32. Vzorek byl nahrazen, ale i tak je vhodné jej vyhodnotit. Vzorek byl součástí testování číslo 7, tudíž byl obráběn za podmínek $a_p = 0,138 \text{ mm}$, $f = 0,07 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, a $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

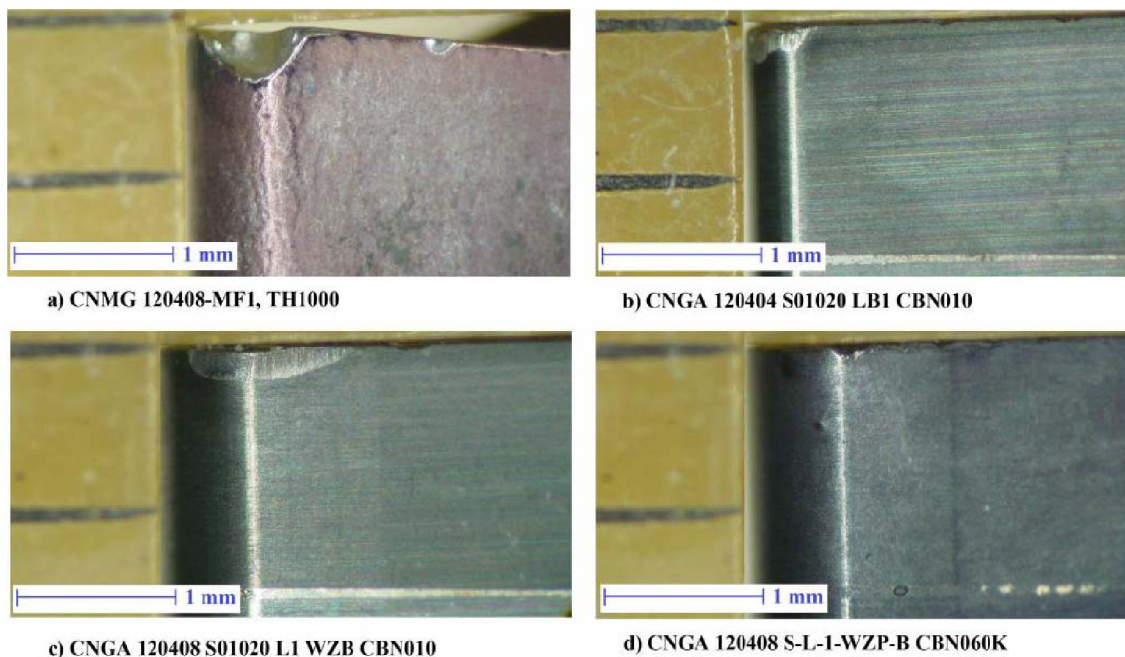
Hodnoty parametrů drsnosti vycházely v tomto testování kolem hodnoty $R_a = 0,6 \text{ } \mu\text{m}$, tudíž jedny z nejlepších výsledků, ale parametr M_p dle Barkhausena se pro testované vzorky pohybuje v hodnotách $M_p = 150$ až 200 mV . Jako příčinu vzniku praskliny je s velkou pravděpodobností možné určit právě povrchové napětí, v tomto případě nejspíše v kombinaci s materiálovou vadou. Hodnoty M_p naměřené na obrobené ploše tohoto vzorku jsou $M_p = 102 \text{ mV}$ a 107 mV . Ve srovnání s hodnotami naměřenými pro testování 7 jsou výrazně nižší, tudíž při vzniku praskliny došlo k uvolnění povrchového napětí.

3.7 Vyhodnocení opotřebení vyměnitelných břitových destiček

Na obr. 3.29 je zobrazeno opotřebení na všech použitých VBD v experimentu. Na snímku je ke každému břitu přiloženo měřítko, jeden dílek se rovná 1 mm. V tab. 3.23 jsou řezné rychlosti a jím odpovídající časy, po kterých se měřilo opotřebení na jednotlivých VBD. Pro každou destičku byly použity dvě řezné rychlosti, kterými bylo obráběno po určitou dobu.

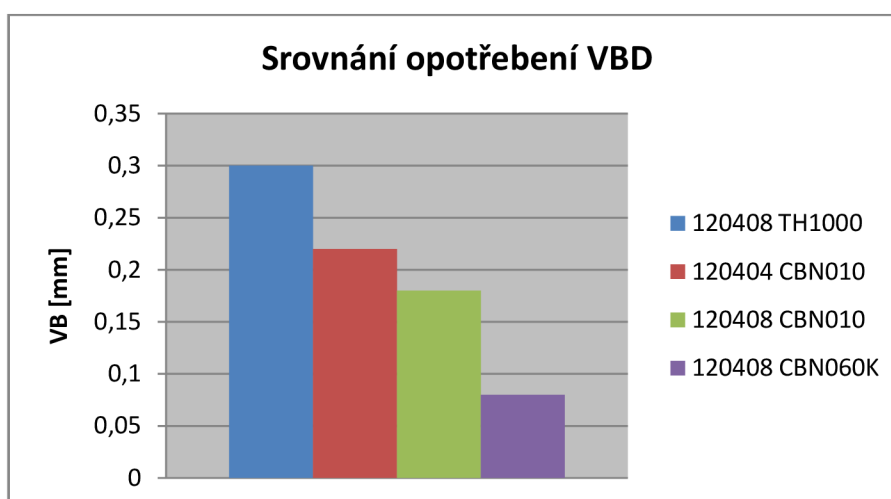
Tab. 3.23 Řezné rychlosti a časy, pro které se měřilo opotřebení VBD

VBD	t_1 [min]	v_{c1} [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	t_2 [min]	v_{c2} [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
CNMG 120408-MF1, TH1000	2,33	150	1,42	250
CNGA 120404 S01020 LB1 CBN010	4,25	110	1,58	300
CNGA 120408 S01020 L1 WZB CBN010	4,25	110	1,58	300
CNGA 120408 S-L-1-WZP-B VNG060K	3,67	110	1,58	250



Obr. 3.29 Detail opotřebení jednotlivých VBD.

Z obr. 3.29 je patrné, že nejlepší opotřebení je u destičky na označené písmenem d). Pro srovnání jednotlivých řezných materiálů VBD byla vytvořena grafická závislost, ve které je znázorněno porovnání zvoleného kritéria opotřebení VB jednotlivých destiček. Nejvhodnější VBD pro obrábění tohoto materiálu se ukázala již zmíněná destička d) z materiálu CBN060K, která vychází jako nejlepší prakticky ve všech měření experimentu. Nejméně vhodný materiál pro obrábění testované oceli z hlediska opotřebení vychází destička a) vyrobená z SK typu H TH1000.



Obr. 3.30 Grafické srovnání opotřebení VB jednotlivých VBD.

4 DISKUZE

Celkově lze vyvodit, že se při experimentu podařilo obrobít plochy s velmi kvalitními výsledky, co se parametrů drsnosti povrchu týče, ale na úkor vysokého zbytkového povrchového napětí. Z výsledků vyplývá, že by realizace navržených řezných podmínek nebyla v praxi příliš vhodná.

Při vyhodnocování měřených parametrů drsnosti vycházeli v některých případech velmi nízké hodnoty, které by se daly srovnávat s hodnotami dosahovanými při jemném broušení. Konkrétně pro testování číslo 7 a 8 parametr drsnosti R_a dosahoval až hodnot $R_a = 0,05 \mu\text{m}$. Jako příčinu lze uvést dobrou kombinaci technologie Wiper s povlakovaným materiálem a vhodně zvolenými řeznými podmínkami.

Z hlediska hodnocení Magnetoelastického parametru dle Barkhausena se vyskytlo hned několik skutečností, u kterých by bylo vhodné provést další experimentální zkoušení. Jako první je závislost hodnoty M_p na zvolené řezné rychlosti při obrábění. Z výsledků tedy vyplývá, že vzorky obráběné vyšší řeznou rychlostí mají parametr M_p nižší. Teoreticky by se tedy dalo předpokládat, že s použitím vyšších řezných rychlostí se snižuje zbytkové povrchové napětí obráběné plochy. V případě experimentu se hraničním hodnotám nejvíce blíží vzorky číslo 36 až 40, které byly obráběny rychlostí $v_c = 250 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Zároveň při porovnání sledovaných parametrů drsnosti mělo zvýšení řezné rychlosti jen minimální vliv. V teoretickém případě by se tedy dalo předpokládat, že při stanovené řezné rychlosti na $v_c = 400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ by parametry drsnosti povrchu měly zůstat přibližně na stejných hodnotách, ale M_p by se měli snížit na přípustné hodnoty, tudíž pod hranici $M_p = 50 \text{ mV}$.

Další zajímavou skutečností je porovnání naměřených hodnot M_p s hodnotami naměřenými v projektu [32, 34, 35, 36, 37]. V projektu byl proveden podobný experiment jako v této práci. Byly zde obráběny kalené kroužky z ocelí 14 109 a 14 209 různými nástroji a řeznými podmínkami, použity byly řezné rychlosti pohybující se okolo hodnoty $v_c = 150 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, což odpovídá nižším hodnotám použitým v tomto experimentu. Hodnoty M_p se zde však pohybovaly okolo $M_p = 20 \text{ mV}$, což je několikanásobně nižší než naměřené hodnoty v této práci. Jako hlavní rozdíl mezi experimenty je tloušťka stěny testovaných kroužků. Ve zmiňovaném projektu byly použity kroužky s tloušťkou stěny 26,5 mm před obrobením a 26,1 mm po obrobení, což je také výrazně vyšší hodnota oproti tomuto experimentu. Zde byly použity kroužky o tloušťce stěny 5 mm před obrobením a 4,73 mm po obrobení.

Menší tloušťka stěny obráběného kaleného kroužku může zapříčinit vznik povrchového napětí při obrábění, ale jako doporučení by bylo vhodné tuto závislost dále experimentálně otestovat.

Vysoké hodnoty parametru M_p by také mohly souviset s tepelným zpracováním testovaných kroužků. Vzhledem k celkovému ovlivnění materiálu při kalení a popouštění by toto zpracování mohlo vyvodit vysoké napětí ještě před samotným obráběním. Tomuto

nasvědčují i hodnoty v tabulce 3.22 měřené na neobrobené ploše vzorku. Tyto hodnoty dosahují přibližně $M_p = 200$ mV, což je poměrně vysoké číslo. Tato skutečnost by také mohla souviset s již zmiňovanou malou tloušťkou stěny a vysoké hodnoty M_p by tedy vznikaly díky kombinaci těchto dvou faktorů.

Z hlediska vysokorychlostního obrábění lze konstatovat, že při většině stanovených řezných podmínek se vysokorychlostního obrábění nedosáhlo. Jediná výjimka je obrábění vzorků 26 až 30, které jsou součástí testování číslo 6, kde se po analýze odebrané třísky jedná o třísku výrazně tepelně ovlivněnou, téměř až natavenou, zbarvenou modrofialově a rozpadávající se na segmenty. Z tohoto důvodu se dá usuzovat, že se již jedná o vysokorychlostní obrábění.

4.1 Návrh dalšího testování vzorků

Jako první návrh na pokračování řešení experimentu by bylo vhodné provést opětovné měření Barkhausenova šumu. V tomto případě však měřit ne jen obrobené vzorky, ale i parametr M_p u kalených kroužků neobrobených a nezakalených. Zároveň by bylo vhodné obrobit různé kroužky stejnými řeznými podmínkami jako ty původní, ale s rozdílnou tloušťkou stěny kroužku. Tímto měřením by se ověřilo, k jakým změnám došlo při obrábění kroužků a zda za vysoké hodnoty parametru M_p může obrábění nebo již tepelné zpracování, popřípadě jaký vliv má na parametr M_p tloušťka stěny. Z těchto zjištění by se pak lépe určovaly další příčiny.

Dalším vhodným testováním by bylo provedení metalografických zkoušek na obrobeném vzorku, na vzorku kaleném neobrobeném a na vzorku tepelně nezpracovaném. Těmito zkouškami by se v první řadě ověřilo, zda původní materiál použitý k testování odpovídá požadovaným normám, dále pak k jakým změnám docházelo během tepelného zpracování a během obrábění z hlediska struktury materiálu.

Jako poslední navrhované testování by se mohlo provést obrábění několika vzorků dle testování číslo 7 a 8. Během experimentu by se testovalo několik různých řezných rychlostí a následně by se na vzorcích měřil parametr M_p . Tímto by bylo možné stanovit závislost hodnoty parametru M_p na velikosti řezné rychlosti.

ZÁVĚR

V úvodu práce je uveden teoretický popis vysokorychlostního obrábění. Z popisu vyplývá, že samotná definice technologie HSC je vcelku složitá a používá se pro ni několik různých definic. V podstatě pro každý materiál má řezná rychlost, která je nutná k dosažení HSC jinou hodnotu.

Z analýzy stávajícího stavu vyplývá, že výroba v podniku je velmi rozsáhlá a tudíž i menší pozitivní změna může zajistit velké úspory nákladů. Výrobní proces vzorové součásti se skládá ze soustružení, následného kalení a dokončovacího broušení. Zefektivnění výrobního procesu tedy spočívá v návrhu inovace výrobního postupu eliminací obecně drahé a náročné technologie broušení.

V diplomové práci byl proveden návrh inovace výrobního procesu a následné experimentální ověření. Návrh spočíval v soustružení již kaleného materiálu, a tudíž při dostatečné jakosti povrchu by broušení už nebylo ve výrobním procesu nutné. Experimentálně byly ověřeny řezné podmínky pro čtyři VBD a pro každou byly testovány dvě různé řezné rychlosti. Následně byly vyhodnocovány parametry drsnosti povrchu a zbytkové povrchové napětí pomocí Barkhausenova šumu. Z analýzy experimentu a naměřených výsledků vyplývá:

- během obrábění nebylo dosaženo vysokorychlostního obrábění s výjimkou testování číslo 6, kde po analýze odcházející třísky lze konstatovat, že se již jedná o HSC obrábění,
- během obrábění byly poškozeny dva testované vzorky,
- VBD z kubického nitridu bóru použitá v testování číslo 3 a 4 CNGA 120404 S01020 L1B CBN010 byla již mírně opotřebována, což negativně ovlivnilo měřenou jakost obrobenej plochy,
- z hlediska parametrů drsnosti povrchu byly naměřeny nejlepší výsledky u VBD z kubického nitridu bóru CNGA 120408 S-L-1-WZP-B CBN060K, kde se naměřené hodnoty pohybují okolo hodnoty $R_a = 0,05 \mu\text{m}$,
- změna stanovené hodnoty řezné rychlosti měla jen velmi malý vliv na hodnoty parametrů drsnosti povrchu,
- z měření parametru M_p podle Barkhausena vyplývá, že ani jeden z testovaných vzorků neodpovídá požadavkům na zbytkové povrchové napětí a tudíž by nebylo vhodné je v praxi používat,

- z hlediska parametru M_p opět vyšla jako nejlepší VBD CNGA 120408 S-L-1-WZP-B CBN060K, kde se měřené hodnoty nejvíce blížily přípustným hodnotám,
- z naměřených hodnot M_p vyplývá, že změna řezné rychlosti má vliv na výslednou hodnotu parametru, při zvýšení řezné rychlosti klesají hodnoty parametru M_p
- z analýzy opotřebení použitých destiček vyplývá, že nejméně opotřebovaná VBD je destička z kubického nitridu bóru CNGA 120408 S-L-1-WZP-B CBN060K,
- nejlepších výsledků prakticky při všech zkouškách dosáhla VBD CNGA 120408 S-L-1-WZP-B CBN060K, tato destička je tedy z testovaných VBD nejvhodnější pro obrábění materiálu 100Cr6

Ze závěrečného hodnocení tedy vyplývá, že za daných podmínek je návrh nevhodný pro praktickou realizaci. Bylo by tedy vhodné rozšířit stávající návrh a provést další testování. Tato testování byla navržena v kap. 4.1 a díky jejich realizaci by bylo možné hlouběji analyzovat danou problematiku.

Všechny cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, A., *Technologie I – Technologie obrábění – 1. část*. [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno: VUT–FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003 [cit. 2015–02–03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf.
2. Schaeffler Slovensko. *Schaeffler Slovensko* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.schaeffler.sk/content.schaeffler.sk/sk/index.jsp>
3. Houdek, J.: *Rychlostní obrábění výhody a limity jeho použití ve strojírenské technologii*, 2001, 10 s.
4. BRYCHTA, J., ČEP, R., SADÍLEK, M., PETŘKOVSKÁ, L., NOVÁKOVÁ, J., *Nové směry v progresivním obrábění*. [online]. Studijní materiály pro obor strojírenské technologie. Ostrava: VŠB – TUO, Fakulta strojní. 2007 [cit. 2015–02–09]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>.
5. ZEMČÍK, O. *Speciální technologie obrábění – Přednášky*. Akademický rok 2014/2015
6. ŠKOPEČEK, T., VODIČKA, J., PAHL, J. P., HERKNER V., *Základy vysokorychlostního obrábění - HSC*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, c2005, ISBN 80-704-3344-2.
7. SCHULZ, H., SCHÜTZER, K., *The history of high speed machining* [online]. Germany: Sao Paolo: Ed. Erica, 2004 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <http://www.unimep.br/phpg/editora/revistaspdf/rct13art01.pdf>
8. Longbottom, J.M., Lanham, J.D., *A review of research related to Salomon's hypothesis on cutting speeds and temperatures*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issue 14, November 2006, Pages 1740-1747, [online]. [cit. 2013-18-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505003214>, ISSN 0890-6955.
9. BARCUCH, J. *Optimalizace nástrojové řezné geometrie pro vysokorychlostní obrábění tenkostěnných součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 79 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc..
10. OETTLE, M., *Tvrde frézování v oblasti nástrojů a forem*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Duben 2005, č. 14., s. 30-31, ISSN 1212-2572.

11. ŠKOPEČEK, T., SVOBODA, J., ŘEHOŘ, J., *Experimentální studium tvorby třísky při HSC – tvrdém frézování*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Prosinec 2003, č. 12., s. 25-26, ISSN 1212-2572.
12. ŠKOPEČEK, T., SVOBODA, J., ŘEHOŘ, J., Hofmann, P., *Tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Duben 2003, č. 4., s. 18, ISSN 1212-2572.
13. KLOUDA, M., *Vysokorychlostní obrábění v CAM systému*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Duben 2005, č. 14., s. 49, ISSN 1212-2572.
14. HOUDEK, J., KOUŘIL K., *Opotřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Prosinec 2004, č. 12., s. 20-21, ISSN 1212-2572.
15. GARANT příručka obrábění, Obj. č. 11 0959, vydání kat. 24, 2006
16. BUKÁČEK, Z. *Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 73 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, Csc.
17. ESF – Inovace studijních programů Strojírenské technologie. ESF – Inovace studijních programů Strojírenské technologie. *Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění* [online] [cit. 2015-3-28] Dostupné z: esf.fme.vutbr.cz/modul/5/hsc_obrabeni_1.pps.
18. HERKNER, V., PAHL, J., ŠKOPEČEK, T., *HSC a bezpečnost práce*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Prosinec 2005, č. 15. s. 52, ISSN 1212-2572.
19. LANÍK, M., *Energetické a ekologické aspekty HSC obrábění*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2011. 88s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Karel Kocman DrSc.
20. SCHULZ H. *Scientific Fundamentals of HSC*. Munchen: Hanser V., 2001 ISBN 34-462-1799-1.
21. MACHÁČEK, M., *Nové technologie a obráběcí stroje*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Květen 2006, č. 17. s. 34 ISSN 1212-2572.
22. (materiálový list oceli 14 109) ČSN 144109. *Chromová ocel pro valivá ložiska: ocel 14 109*. Praha: český normalizační institut, 1978.
23. Nizkolegované konstrukční oceli třídy 14, jejich složení a tepelné zpracování. *TumliKOVO: Technologie strojního obrábění kovů*. [online]. 2015 [cit. 2015-04-24].

Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/nizkolegovane-konstrukcni-oceli-tridy-14-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>.

24. Trens Slovensko. *SLB 500*. [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.trens.sk/sk/produkty/sustruznicke-centra/sbl-500>
25. ŠMÍDA, M., *CNC sůstruženie ILS* – Přednáška. Akademický rok 2013/2014.
26. ŠMÍDA, E., *Racionalizácia vybraných operácií obrábania v INA Skalica spol. s.r.o.* Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnavě, 2013. 96 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Ivan Baránek, CSc.
27. NESLUŠAN, M., *Monitorovanie integrity povrchu po brúsení kalených ložiskových ocelí s využitím Barkhausenovho šumu*. Žilina: Žilinská univerzita, Strojnícká fakulta. 2013. 23 s.
28. Fertigung von VDI Werkzeughaltern. *Spannmutern und Stangengreifer*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.zuern-tools.de/>
29. Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz>
30. *Vliv parametrů na teoretickou a skutečnou drsnost povrchu*. [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_13.pdf
31. PROKOP, J. *Vybrané statě z obrábění* – Přednášky. Akademický rok 2014/2015
32. FR-TI4/247, Výzkum a vývoj konstrukce a technologie energeticky účinných soudečkových ložisek s mosaznou klecí (2012 až 2015, MPO ČR). Hlavní řešitel: doc. Ing. Josef Chladil, CSc.
33. SECO Tools. SECO Tools. [online]. 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/>
34. SEDLÁK, J., FIŠEROVÁ, Z., CHLADIL, J., ZEMČÍK, O., DVOŘÁČEK, J. The Influence of Lubricants on the Durability of Roller Bearings. *Journal PROCEEDINGS IN MANUFACTURING SYSTEMS*, 2013, vol. 8, no. 4, p. 213-220. ISSN: 2067-9238.
35. ZEMČÍK, O., CHLADIL, J., OTOUPALÍK, J., SEDLÁK, J. Changes in the surface layer of rolled bearing steel. *Journal PROCEEDINGS IN MANUFACTURING SYSTEMS*, 2013, vol. 8, no. 2, p. 99-104. ISSN: 2067-9238.

36. OSIČKA, K., CHLADIL, J., KALIVODA, M., OTOUPALÍK, J. Contribution to turning hardened steel. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies*, 2014, vol. 8, no. VI., p. 705-712. ISSN: 1314-7269.
37. OSIČKA, K., FIŠEROVÁ, Z., OTOUPALÍK, J. Influence of cutting tool overhangs at machining of hardened steels. *Manufacturing TECHNOLOGY*, 2015, vol. 15, no. 2, p. 188-191. ISSN: 1213-2489.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
SK	[-]	slinutý karbid
HRC	[-]	tvrdost dle Rockwella
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition
HSC	[-]	Hight Speed Cutting
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
DRAPA	[-]	Defense Advanced Project Agency
USAAF	[-]	United States of Army Air Force
HSM	[-]	High Speed Machining
HPM	[-]	High Performance Machining
HPC	[-]	High Performance Cutting
CAD	[-]	Computer aid design
CAM	[-]	Computer aid manufacturing
S-N-O	[-]	Stroj – Nástroj - Obrobek
NC	[-]	Numeric Control
CNC	[-]	Computer Numeric Control
HB	[-]	tvrdost podle Brinella
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse

Symbol	Jednotka	Popis
v_c	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
T	[°C]	Teplota
v_f	[m.min ⁻¹]	Posuvová rychlost
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
n	[min ⁻¹]	otáčky
f	[mm.ot ⁻¹]	posuv
β_1	[°]	Úhel střížné roviny

P	[W]	Mechanický výkon
Q_c	[J.min ⁻¹]	Celkové množství tepla
Q_{SPD}	[J.min ⁻¹]	Teploto vzniklé v oblasti sekundární plastické deformace
F_c	[N]	Řezná síla
F_t	[N]	Třecí síla
V_{1'}	[m.min ⁻¹]	Rychlost odcházející třísky
t_t	[°C]	Teplota třísky
q	[%]	Podíl práce přeměněné na teplo
q_t	[%]	Podíl tepla přecházejícího do třísky
m_t	[kg]	Hmotnost třísky
c	[J/kg.K]	Měrná tepelná kapacita
R_m	[Mpa]	Mez pevnosti
A₅	[%]	tažnost
R_a	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu
R_z	[μm]	Největší výška profilu
I_r	[μm]	Relativní délka profilu
R_p	[μm]	Největší výška výstupku profilu
R_v	[μm]	Největší hloubka prohlubně profilu
r_ε	[mm]	Poloměr špičky nástroje
κ_r	[°]	Úhly nastavená hlavního ostří
κ_{r'}	[°]	Úhly nastavení vedlejšího ostří
R_{a_t}	[μm]	Teoretická průměrná aritmetická úchylka profilu
R_{z_t}	[μm]	Teoretická největší výška profilu
LS₁	[-]	Statistická mez
s	[-]	Odhad směrodatné odchylky
x	[-]	Odhad střední hodnoty
mh₁	[-]	Komfidenční mez
M_p	[mV]	Magnetickoelastický parametr

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list oceli 14 109
- Příloha 2 Výkres vnějšího kroužku jehličkového ložiska
- Příloha 3 Protokol o tepelném zpracování
- Příloha 4 Výsledky měření TaylorHobsona vzorku číslo 34
- Příloha 5 3D struktura povrchu nasnímaná přístrojem Alicona
- Příloha 6 Grafy statistického vyhodnocení

PŘÍLOHA 1

OCEL 14 109		CHROMOVÁ OCEL PRO VALIVÁ LOŽISKA					ČSN 41 4109 STN 41 4109	
Chemické složení [hm. %]								
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ni+Cu	P	S
0,90-1,10	0,30-0,50	0,15-0,35	1,30-1,65	max 0,30	max 0,25	max 0,50	max 0,027	max 0,030
Polotovary								
[1] předvalky				[4] bezešvé trubky tvářené za tepla				
[2] tyče válcované za tepla				[5] tyče tažené za studena				
[3] výkovky				[6] dráty tažené za studena				
Mechanické vlastnosti								
Polotovary	[1] [2] [3]		[4]		[5] [6]			
Rozměr t,d [mm]	-		-		-			
Stav	.3		.3		.3			
Mez kluzu R_e [MPa]	441		-		441			
Mez pevnosti R_m [MPa]	608-726		608-726		628-765			
Tažnost A_5 [%] inf.podél	18		18		18			
Kontrakce Z [%] inf.	35		35		35			
Vrubová houževnatost KCU 2	-		-		-			
Tvrdost HB	max 210		max 220		max 225			
Modul pružnosti E [GPa]	213 (při 23 HRC), 210 (při 54HRC), 202 (při 63HRC)							
Modul pruž.ve smyku G [GPa]	-		-		-			
Teplota [°C] / tvrdost			20		200		400	
Modul pružnosti E [GPa]	23HRC		213		202		188	
za zvýšených teplot	54HRC		210		197		182	
Fyzikální vlastnosti								
Hustota	ρ [kg.m ⁻³]		7 850					
Měrná tepelná kapacita	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]		480					
Teplotní součinitel roztažnosti	α [K ⁻¹]		12,5.10					
Tepelná vodivost	λ_t [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]		37,26					
Rezistivita	ρ [Ω . m]		256.10					
Technologické údaje								
Ocel je dobře tvařitelná za tepla a je vhodná k přímému kalení, ve stavu žíhaném na měkko dobře obrobitelná. Optimální průměr, nebo tloušťka zušlechťení je asi 20mm. Ocel je vhodná na součásti s velmi tvrdým povrchem odolným proti opotřebením.								
▶ kování 750 až 1 100 °C				▶ kalení do vody 790 až 820 °C				
▶ normalizační žíhání 860 až 890 °C				▶ kalení do oleje 820 až 850 °C				
▶ žíhání na měkko 720 až 760 °C				▶ popouštění 150 až 220 °C				
Nejnižší tvrdost po kalení do oleje 62HRC Mikrostruktura ve stavu .3: zrnitý perlit, zbytky lamelárního perlitu jsou dovoleny do 10% tvrdost HRC při teplotě popouštění								
Teplota			150 °C	175 °C	200 °C	250 °C		
doba popouštění [h]	2	63,0	62,0	60,2	58,0			
	4	62,5	61,0	59,1	57,0			
Tvařitelnost za tepla třída 2								
Obrobitelnost		soustružení		frézování, vrtání		broušení		
polotovary	[2],[3]	stav .3	13b	13b		-		
	[4]	stav .3	13b	13b		-		
	[5]	stav .3	12b	12b		-		

**OCEL
14 109**

**CHROMOVÁ OCEL
PRO VALIVÁ LOŽISKA**

**ČSN 41 4109
STN 41 4109**

Odolnost proti degradačním procesům

Odolnost proti korozi normální.

Odolnost proti opotřebení

HRC	opotřebení [mg . mm ⁻² . m ⁻¹]
58 - 59	0,0267
61 - 62	0,0240

Hodnoty platí pro odvalování válečků bez mazání, při zatížení 981MPa. Opotřebení je dáno úbytkem hmotnosti [mg], součinitelem stykové plochy [mm] a proběhnuté dráhy [m].

Odolnost proti únavě

mez únavy v ohybu při syntetickém cyklu [MPa]

pro:	HRC	58,5-59,0	630
	HRC	60,5-61,0	715
	HRC	62,5-63,0	645

Použití

Pro výrobu kuliček do Ø 25mm, válečků a kuželíků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm.

Ostatní vlastnosti

Druh oceli podle způsobu výroby	Barevné značení ČSN 42 0010	Třída odpadu ČSN 42 0030
elektroocel	modrá - bílá - oranžová	8

Porovnání se zahraničními materiály

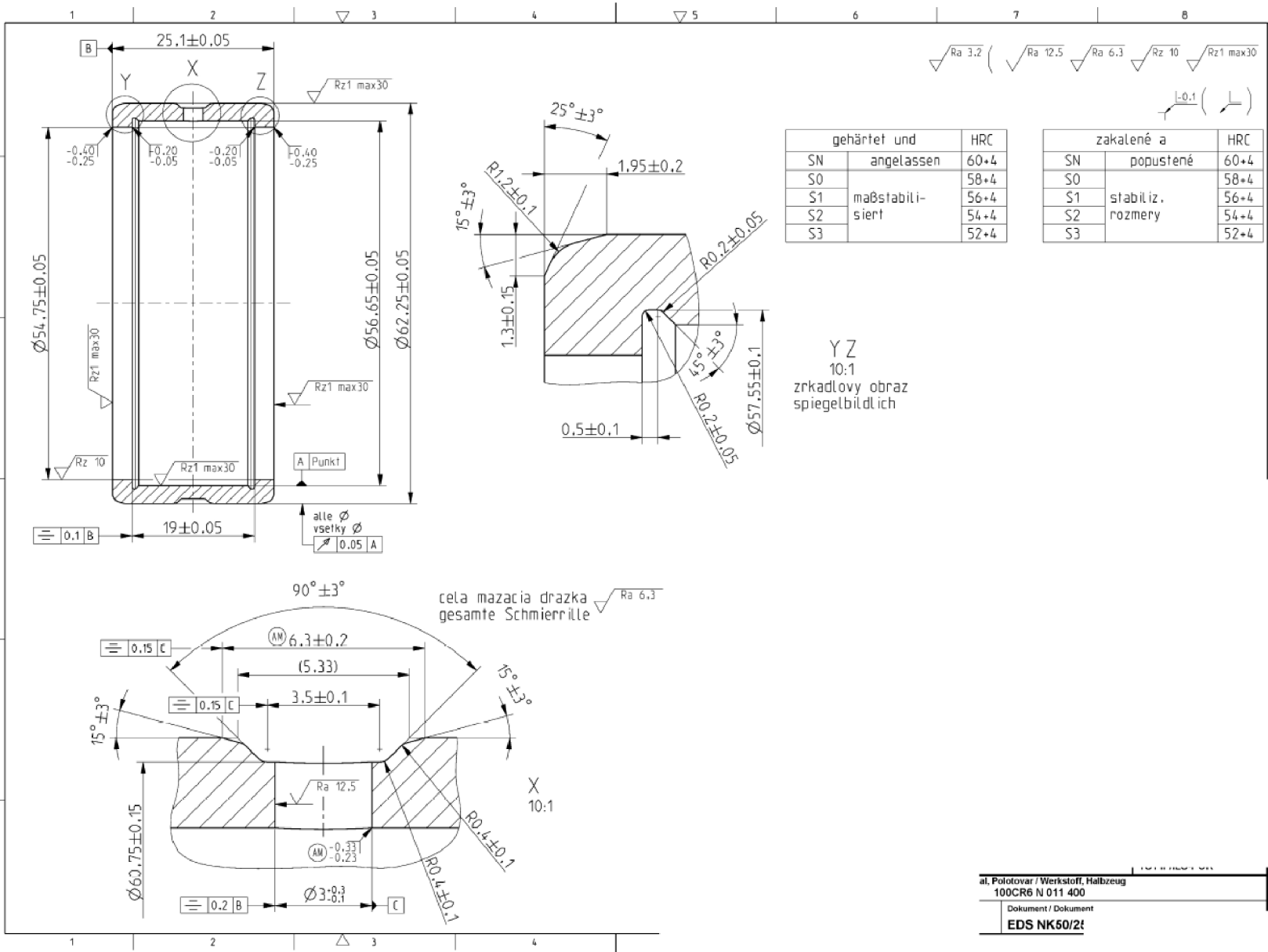
ISO		EURO		Německo	
Type 1-0	ISO 683/17-73	100Cr6	EN94-73	100Cr6	DIN 17230-80
Francie		Velká Británie		Rusko	
100Cr6	NF A35 - 565 - 94	535 A99	BS 970/10-083	ŠCh 15	GOST 801-81
100Cr6	NF A35 - 552 - 86	2S135			
100Cr6	NF A35 - 553 - 82				
100Cr6	NF A36 -102 - 93				

PŘÍLOHA 2

Prva metoda je urýchlená metóda, ktorá umožňuje určiť tvrdosť podľa vzťahu medzi tvrdosťou a pevnosťou. Táto metóda je určená pre materiály s tvrdosťou do 60 HRC. Pre materiály s tvrdosťou nad 60 HRC je potrebné použiť druhú metódu. Táto metóda je určená pre materiály s tvrdosťou do 60 HRC. Pre materiály s tvrdosťou nad 60 HRC je potrebné použiť druhú metódu. Táto metóda je určená pre materiály s tvrdosťou do 60 HRC. Pre materiály s tvrdosťou nad 60 HRC je potrebné použiť druhú metódu.

Metóda podľa vzťahu medzi tvrdosťou a pevnosťou. Táto metóda je určená pre materiály s tvrdosťou do 60 HRC. Pre materiály s tvrdosťou nad 60 HRC je potrebné použiť druhú metódu. Táto metóda je určená pre materiály s tvrdosťou do 60 HRC. Pre materiály s tvrdosťou nad 60 HRC je potrebné použiť druhú metódu.

Prva metóda je urýchlená metóda, ktorá umožňuje určiť tvrdosť podľa vzťahu medzi tvrdosťou a pevnosťou. Táto metóda je určená pre materiály s tvrdosťou do 60 HRC. Pre materiály s tvrdosťou nad 60 HRC je potrebné použiť druhú metódu. Táto metóda je určená pre materiály s tvrdosťou do 60 HRC. Pre materiály s tvrdosťou nad 60 HRC je potrebné použiť druhú metódu.

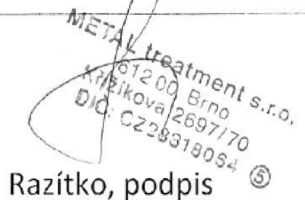


PŘÍLOHA 3

METAL treatment s.r.o. Křižíkova 68a 612 00 Brno-Královo Pole	mob.: 775 566 358 Tel.: 532 045 265
--	--

Osvědčení o dosažených vlastnostech po tepelném zpracování

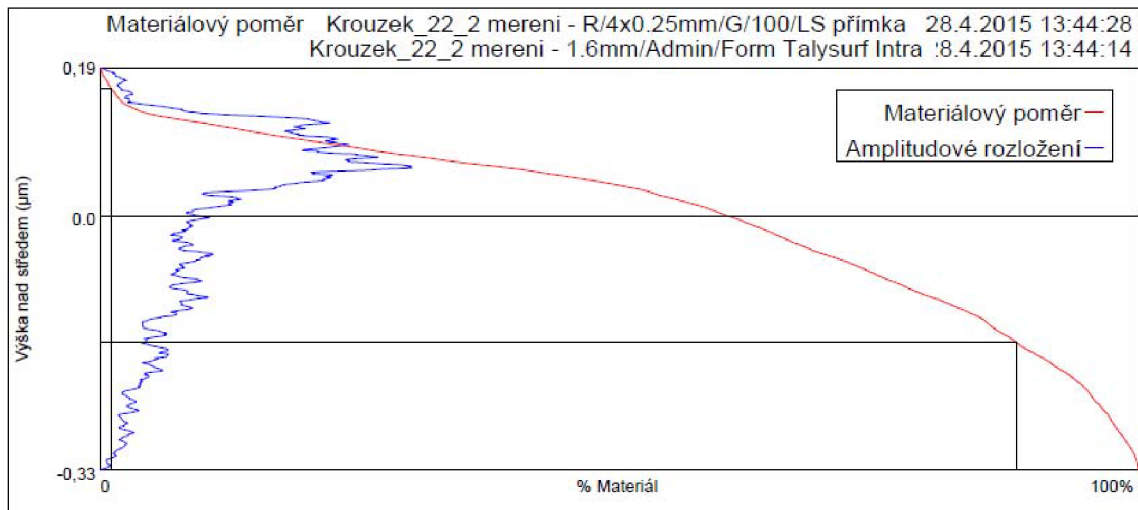
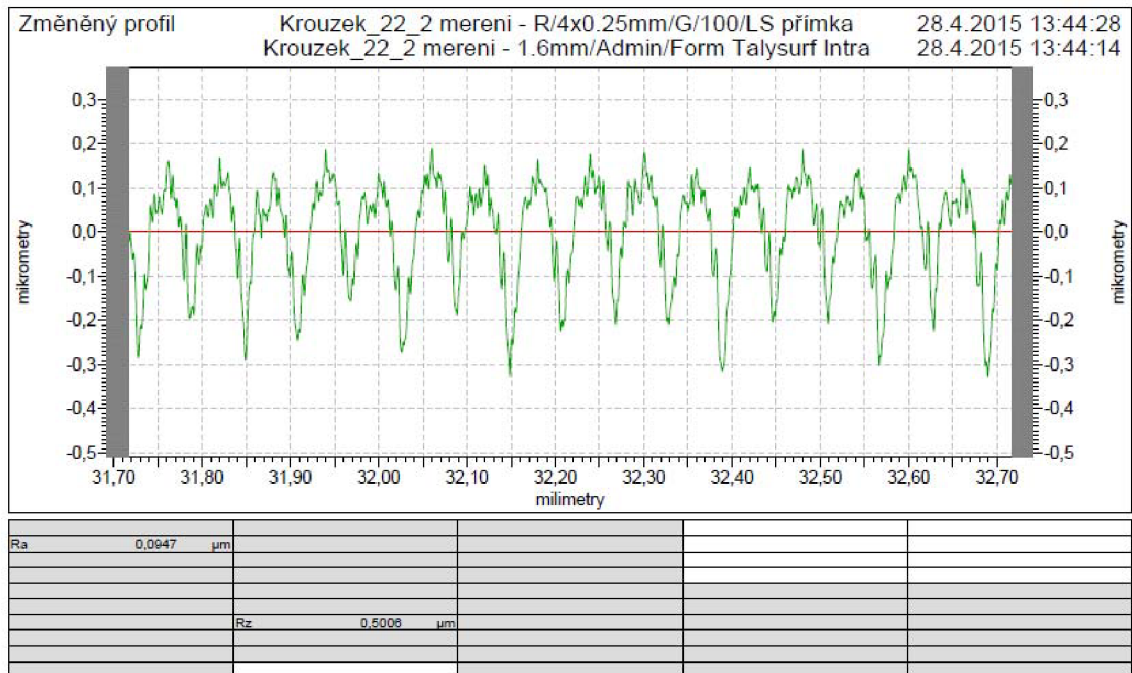
Zákazník	TROPP PAVEL
Příkaz-položka	
Zakázkové číslo	759/2015
Název součásti	KROUŽEK
Materiál	14 109
Počet kusů	42
Požadované hodnoty	62+-2 Hrc
Dosažené hodnoty	60-61 Hrc

Vystavil: Konečný Rostislav Datum: 16.04.2015	 Razítko, podpis
--	--

Technologie:

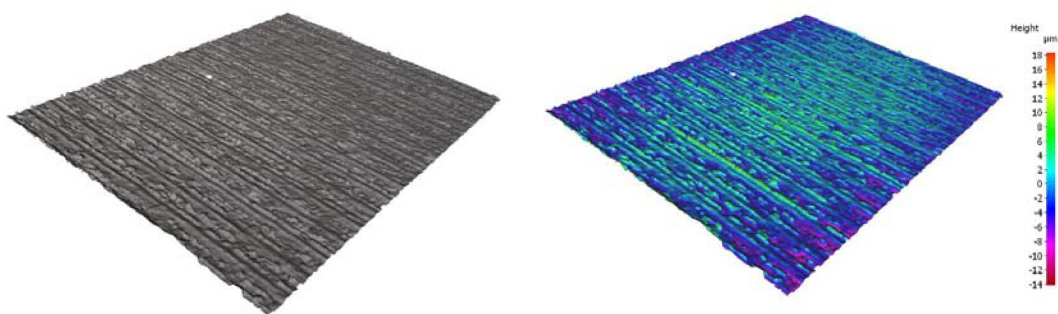
	840°C/20min./olej
	170°C/150min./vzduch

Diagram:

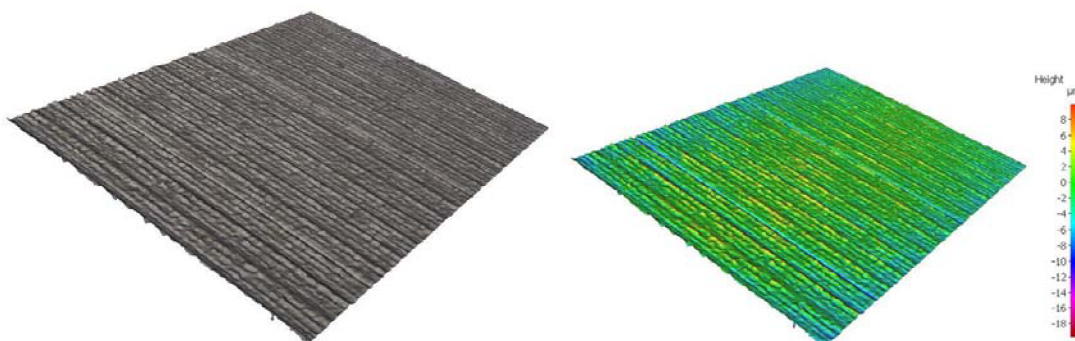


Upper Cursor	Band	Lower Cursor
Úroveň	0,16 μm	Úroveň
mr 1%	1,1 %	mr 2%
HSC	5 výstupků	HSC
Pásmo/Htp	0,33 μm	Úroveň
Delta mr%	87,2 %	mr 2%
Počet výstupků	70 výst/cm	HSC
		Úroveň
		-0,16 μm
		88,3 %
		16 výstupků

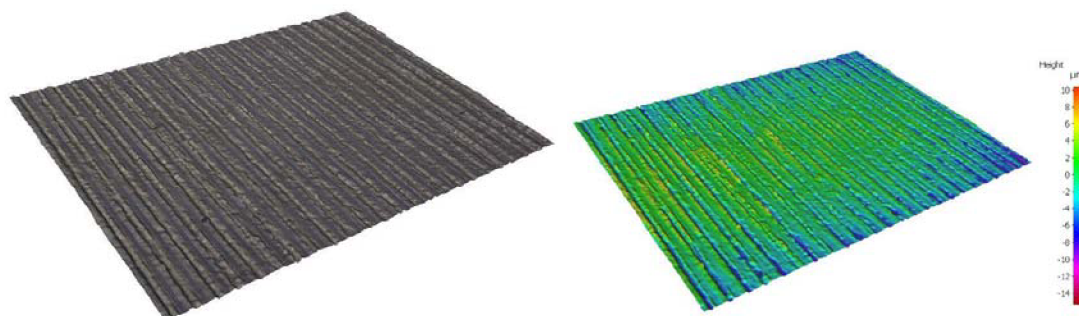
PŘÍLOHA 5



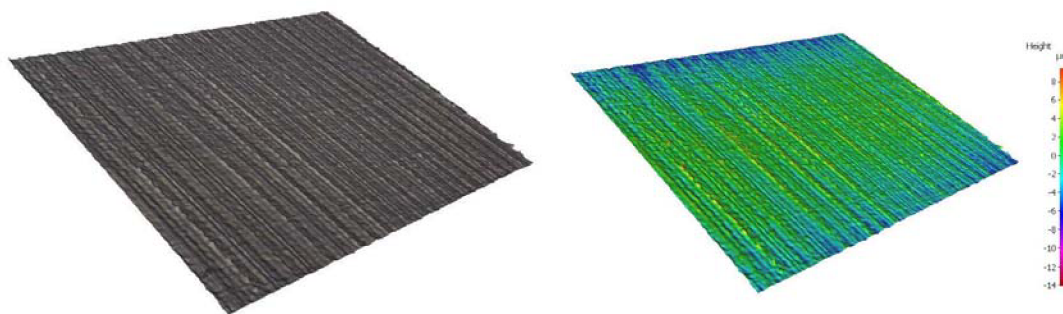
Vzorek číslo 2



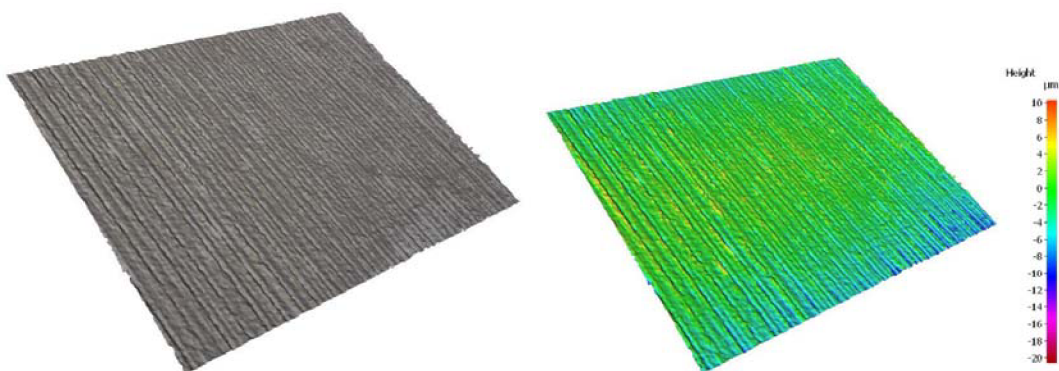
Vzorek číslo 7



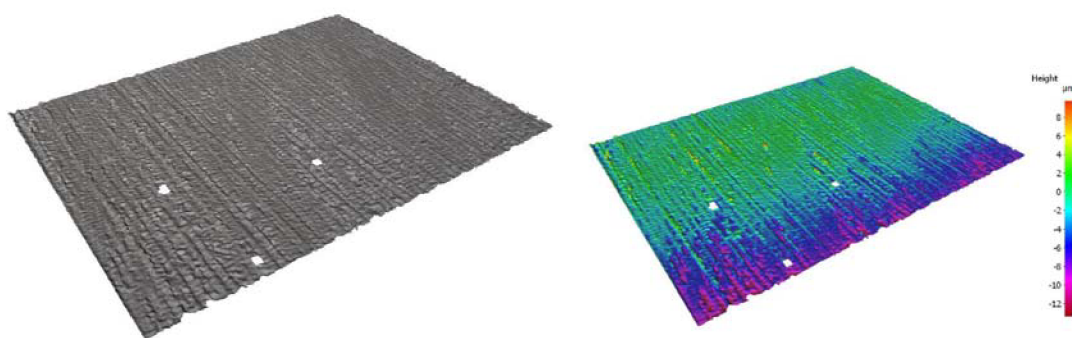
Vzorek číslo 12



Vzorek číslo 17



Vzorek číslo 22



Vzorek číslo 32

PŘÍLOHA 6

