

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OBRÁBĚNÍ TĚŽKO O BROTITELNÝCH MATERIÁLŮ SOUSTRUŽENÍM

MACHINING OF HARD-TO-MACHINE MATERIALS BY TURNING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Švorc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Josef Švorc**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2018/19

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:

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů soustružením

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá rozdělením těžkoobrobitelných materiálů, příčinami jejich zhoršené obrobitelnosti, mechanismy utváření třísky, návrhem experimentálních zkoušek a jejich vyhodnocením.

Cíle diplomové práce:

- Teoretický rozbor problematiky obrábění těžkoobrobitelných materiálů soustružením.
- Přehled nástrojových materiálů pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů a geometrie nástrojů.
- Návrh experimentální zkoušky vybraného těžkoobrobitelného materiálu.
- Realizace experimentů, jejich statistické vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

SUDHANSU, R. D., DEBABRATA, D., AMARESH, K. Study of surface roughness and flank wear in hard turning of AISI 4140 steel with coated ceramic inserts. *Journal of Mechanical Science and Technology* 29 (10). 2015. p. 4329-4340. [www.springerlink.com/content/1738-494x\(Print\)/1976-3824\(Online\)](http://www.springerlink.com/content/1738-494x(Print)/1976-3824(Online).). DOI 10.1007/s12206-015-0931-2.

GRZESIK, W. Machining of hard materials, In: Paulo Davim, J. (ed.), *Machining Fundamentals and Recent Advances*, Springer-Verlag London. 2008. p. 97-126.

BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne. Slovensko, Trenčín. 2004. s. 112. ISBN 80-8075-013-0.

BARÁNEK, I., ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín. 2004. s. 212. ISBN 80-8075-013-0.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed. 2005. p. 651. ISBN 0-1-514206-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na obrábění těžkoobrobitelných materiálů. V teoretické části jsou výše zmíněné materiály rozděleny a charakterizovány. Dále se práce specifikuje na kalené oceli a jejich tepelné zpracování, obrobitelnost a mechanismus opotřebení a vzniku třísky. Jsou zde uvedeny nástrojové materiály a jejich třídy vhodné pro obrábění kalených ocelí. Praktická část se zabývá vlivem řezných podmínek na drsnost obrobeného povrchu při soustružení kalené oceli.

Klíčová slova

kalená ocel, obrobitelnost, těžkoobrobitelné materiály, soustružení, řezné podmínky, nástrojové materiály

ABSTRACT

The thesis is focused on machining of hard-to-machine materials. In the theoretical part hard-to-machine materials are divided and characterized. Furthermore, the thesis specifies hardened steels and their heat treatment, machinability and mechanism of wear and chip formation. There are tool materials and their classes suitable for machining hardened steels. The practical part deals with the influence of the cutting conditions on the roughness of the machined surface when turning hardened steel.

Key words

hardened steel, machinability, hard-to-machine materials, cutting conditions, tool material

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠVORC, Josef. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů soustružením* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117117>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Obrábění těžkoobrobitelných materiálů soustružením** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Josef Švorc

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat společnosti KSK Precise Motion za umožnění měření experimentálních zkoušek a samozřejmě i své rodině a blízkým za podporu, kterou mi po celou dobu studia poskytovali.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	9
1 OBROBITELNOST MATERIÁLŮ	10
1.1 Hodnocení obrobitelnosti.....	10
1.2 Zkoušky obrobitelnosti.....	12
2 ROZDĚLENÍ TĚŽKO OBROBITELNÝCH MATERIÁLŮ.....	13
2.1 Korozivzdorné oceli	13
2.1.1 Feritické korozivzdorné oceli.....	14
2.1.2 Martenzitické korozivzdorné oceli	14
2.1.3 Austenitické korozivzdorné oceli.....	14
2.1.4 Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli	15
2.1.5 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí	15
2.2 Titan a jeho slitiny.....	16
2.2.1 Slitiny α a pseudo α	16
2.2.2 Slitiny $\alpha+\beta$	16
2.2.3 Slitiny β a pseudo β	17
2.2.4 Obrobitelnost titanových slitin	17
2.3 Superslitiny.....	18
2.3.1 Superslitiny a jejich obrobitelnost.....	19
3 KALENÉ OCELI	20
3.1 Základní terminologie	20
3.1.1 Kalitelnost	20
3.1.2 Zakalitelnost.....	20
3.1.3 Prokalitelnost	20
3.2 Způsoby kalení ocelí	22
3.2.1 Martenzitické kalení	22
3.2.2 Bainitické kalení.....	23
3.3 Popouštění ocelí.....	24
3.3 Zušlechťování.....	25
3.4 Povrchové kalení.....	25
3.5 Kalicích prostředí	27
3.6 Oceli vhodné pro kalení a zušlechťování.....	27
4 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY	28
4.1 Nástrojové materiály pro kalené ocele	30
4.2 Slinuté karbidy.....	30
4.2.1 Povlakované slinuté karbidy	32
4.3 Řezná keramika	33
4.3.1 Oxidická řezná keramika	33

4.3.2 Neoxidická keramika.....	34
4.3.3 Vyztužená keramika	34
4.4 Kubický nitrid boru	35
4.5 Sortiment nástrojových materiálů pro soustružení.....	36
4.5.1 Sandvik Coromant	36
4.5.2 Dormer Pramet	37
4.5.3 Seco Tools.....	37
4.5.4 Iscar.....	37
5 SOUSTRUŽENÍ KALENÝCH OCELÍ	39
5.1 Obrobitelnost kalených ocelí a geometrie nástrojů.....	39
5.2 Mechanizmy a formy opotřebení nástroje	40
5.2.1 Mechanizmy opotřebení	40
5.2.2 Formy opotřebení	42
5.3 Mechanismus tvorby třísky	43
5.4 Drsnost povrchu obrobeneé plochy.....	44
5.4.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a	44
5.4.2 Největší výška profilu R_z	45
6 REALIZACE EXPERIMENTU	46
6.1 Obráběcí stroj.....	46
6.2 Obráběcí nástroj.....	47
6.3 Materiál obrobku.....	48
6.4 Měřicí zařízení.....	48
6.5 Provedení experimentálních zkoušek.....	49
6.5.1 Naměřené hodnoty R_a a R_z	50
6.5.2 Výpočet teoretické hodnoty drsnosti	51
6.5.3 Vzoroky třísek	51
6.5.4 Vyhodnocení získaných hodnot	60
6.6 Opotřebení vyměnitelné břitové destičky.....	62
7 DISKUSE	64
ZÁVĚR	65
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	66
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	70
SEZNAM PŘÍLOH	71

ÚVOD

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů souvisí s vývojem průmyslu a techniky. Letecký, chemický, automobilový či vojenský průmysl klade vyšší požadavky na mechanické vlastnosti a spolehlivost jednotlivých strojních součástí. Při vývoji nových materiálů splňujících vysoké požadavky pro dané aplikace je nezbytné myslet i na způsob jak tyto materiály obrábět s ohledem na ekonomiku a ekologii. Tyto materiály se kvůli svým vlastnostem často řadí do skupiny tzv. těžkoobrobitelných materiálů, do které patří např. žárupevné a žáruvzdorné slitiny na bázi niklu, železa a kobaltu, titan a jeho slitiny a korozivzdorné oceli.

Kalené oceli lze zařadit do problematiky obrábění těžkoobrobitelných materiálů. V současné době se už broušení nejeví jako jediná vhodná metoda pro obrábění kalených ocelí. Kalené oceli je již možné obrábět všemi základními metodami třískového obrábění, díky moderním nástrojovým materiálům, ať už to jsou např. povlakované slinuté karbidy, rezná keramika, nebo supertvrký rezný materiál kubický nitrid boru.

S vývojem, případně inovacemi nástrojových materiálů, geometrií a povlaků pro rezné nástroje je sortiment nabízených nástrojů poměrně široký a umožňuje zákazníkovi volbu nástroje pro dokončovací, ale i hrubovací operace kalených ocelí i jiných těžkoobrobitelných materiálů. Důležité však je optimální nastavení rezných parametrů pro dané rezné nástroje, a tím dosažení vyhovující kvality povrchu obrobku při odpovídající trvanlivosti nástroje.

1 OBROBITELNOST MATERIÁLŮ

Obrobitelnost charakterizuje vhodnost daného materiálu k obrábění určitou metodou a je jednou z nejdůležitějších technologických vlastností materiálů. Zahrnuje vliv fyzikálních a mechanických vlastností, chemického složení materiálu včetně výroby a tepelného zpracování polotovaru na průběh a na kvalitativní a kvantitativní, popřípadě ekonomické výsledky procesu řezání. Obrobitelnost však nezávisí pouze na materiálu, ale i na metodě obrábění či nastavení řezných podmínek [1-3]. Nejdůležitější faktory, které ovlivňují obrobitelnost jsou:

- způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu (tvrdost, pevnost, houževnatost, tepelná vodivost, stav povrchové vrstvy),
- metoda obrábění (soustružení, frézování, vrtání, broušení atd.),
- řezné podmínky (řezná rychlost, šířka záběru ostří, posuv na otáčku),
- geometrie nástroje (úhly polohy ostří, úhly čela a hřbetu),
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu (tvrdost za vysokých teplot, chemická stabilita, odolnost proti opotřebení) [4].

1.1 Hodnocení obrobitelnosti

S ohledem na výše uvedené faktory je obrobitelnost obtížné charakterizovat nebo hodnotit určitou danou absolutní hodnotou. Lze absolutní hodnotu vyjádřit pomocí objemu odebraného materiálu, případně velikostí obrobené plochy. Častěji se proto uvádí, že obrobitelnost je relativní vlastnost. K jejímu hodnocení se využívá tzv. komparační neboli porovnávací metoda. Pro určení obrobitelnosti je nutné daný materiál porovnat s jiným materiálem, avšak obráběným za stejných a přesně definovaných podmínek. Kritériem pro srovnání pak lze stanovit: teplotu řezání, utváření třísky a její dělení, velikost řezných sil, struktura povrchu obrobené plochy, případně velikost řezné rychlosti [1,4]. Technické konstrukční materiály jsou z důvodu potřeby vyhodnocení obrobitelnosti rozděleny podle CNN (Celostátní normy a normativy) do následujících základních skupin, které jsou označeny malými písmeny:

- a – litiny,
- b – oceli,
- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi),
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku),
- e – plastické hmoty,
- f – přírodní nerostné hmoty,
- g – vrstvené hmoty,
- h – pryže,
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců [1].

Vždy je v jednotlivé skupině vybrán jeden konkrétní materiál a ten slouží jako etalon obrobitelnosti. K tomuto materiálu je pak vztahena relativní obrobitelnost ostatních materiálů z dané skupiny. Na základě indexu kinetické obrobitelnosti vypočítaného ze vztahu (1.1) jsou materiály jednotlivých skupin děleny do tříd obrobitelnosti.

$$i_o = \frac{v_{c15}}{v_{c15et}} \quad [-] \quad (1.1)$$

kde:

i_o	[-]	- index kinetické obrobitelnosti
v_{c15}	[m·min ⁻¹]	- řezná rychlost při trvanlivosti T=15 min pro sledovaný materiál
v_{c15et}	[m·min ⁻¹]	- řezná rychlost při trvanlivosti T=15 min pro etalonový materiál

Jednotlivé třídy se označují číslem, které je umístěno před písmeno dané skupiny (např. 12a, 18b, 12c atd.). V jednotlivých třídách jsou střední hodnoty indexu obrobitelnosti odstupňovány geometrickou řadou s kvocientem $q=10^{1/10} = 1,26$. To znamená, že sousední třídy jedné dané mají hodnotu řezné rychlosti v_{ct} 1,26krát vyšší/nížší, nežli je tomu v dané třídě. Materiály, které mají číslo třídy nižší než etalonový materiál dané skupiny, mají horší obrobitelnost oproti etalonovému materiálu. V případě vyššího čísla třídy, než je třída etalonového materiálu, je obrobitelnost lepší. Přehled vybraných skupin materiálů a jejich rozsah tříd lze vidět v tab. 1.1 [1, 3, 4].

Tab. 1.1 Přehled skupin materiálů, jejich tříd obrobitelnosti a etalonu pro obrábění [1].

Rozsah tříd obrobitelnosti	Skupina materiálů	Etalon	Zařazení v třídě
1 – 14	a -litiny	šedá litina nelegovaná, ČSN 42 2420, tvrdost 190 HB	10a
1 – 20	b -oceli	ušlechtilá uhlíková ocel, ČSN 41 2050.1, tvrdost 180-200 HB	14b
2 – 15	c -těžké neželezné kovy	automatová mosaz tvářená za tepla, ČSN 42 3213.21, tvrdost 90 HB	11c
4 – 16	d -lehké neželezné kovy	tvářená slitina hliníku, vytvrzená, ČSN 42 4380.11, tvrdost 100 HB	10d

V některých případech lze u oceli obrobitelnost zvýšit přidáním určitého prvku, například síry. Proto je koncentrace síry u automatových ocelí vyšší. Velký vliv na obrobitelnost ocelí má však i uhlík, jehož obsah v oceli výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti. V tabulce 1.2 je možné vidět další legující prvky, které mají pozitivní případně negativní vliv na obrobitelnost ocelí [5].

Tab. 1.2 Přehled legujících prvků a jejich vliv na obrobitelnost ocelí [5].

Pozitivní vliv	Pb, S, P, C (0,3-0,6 %)
Negativní vliv	Mn, Ni, Co, Cr, V, Mo, Nb, W, C < 0,3 %, C > 0,6 %

1.2 Zkoušky obrobiteľnosti

Základní rozdělení zkoušek obrobiteľnosti je dle časového hlediska na dlouhodobé zkoušky a krátkodobé.

Dlouhodobá zkouška obrobiteľnosti je prováděna metodou soustružení, popřípadě frézováním. Kvalitativním kritériem je velikost řezné rychlosti, která však musí odpovídat stanovené době trvanlivosti. Zkouška se provádí za předem dohodnutých konstantních řezných podmínek. Typ a geometrie nástroje se též nemění. Velikost řezné rychlosti je odstupňovaná a proces obrábění je zastaven až při dosažení stanoveného opotřebení břitu.

Z ekonomického hlediska jsou výhodnější krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti v porovnání s dlouhodobými, při kterých dochází k velkému úběru materiálu a s tím související energetické náklady a náklady na obsluhu stroje. Stanovení výsledků z krátkodobých zkoušek je rychlé, a to je vhodné například pro rozřídění skupin materiálů dle stupně obrobiteľnosti, případně pro ověření stupně obrobiteľnosti jednotlivých dodávek stejného materiálu od dodavatele [1, 4, 6].

2 ROZDĚLENÍ TĚŽKO OBRÁBĚLÝCH MATERIÁLŮ

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů je doprovázeno vysokým napětím, které způsobuje velké deformace v oblasti primární plastické deformace i v oblasti kontaktu čela řezného nástroje s třískou, což má za následek vznik velkého množství tepelné energie. Tvrdé částice obsažené ve struktuře obráběného materiálu ve spojení s mechanickým a tepelným zatížením břitu nástroje mají vliv na opotřebením nástroje a s tím související snižování trvanlivosti nástroje. Tyto faktory proto zásadně ovlivňují volbu vhodného typu nástroje a nástrojového materiálu, které následně mají rozhodující vliv na rozměrovou a tvarovou přesnost obrobku, drsnost povrchu obrobených ploch.

Mezi těžkoobrobitelné materiály se řadí následující:

- korozivzdorné oceli,
- kalené a zušlechťené oceli,
- superslitiny (na bázi železa, kobaltu, nebo niklu),
- titanové slitiny,
- kompozitní materiály,
- keramické materiály,
- materiály vyrobeny práškovou metalurgií (např. slinuté karbidy),
- slitiny hliníku s vysokým obsahem křemíku,
- platinu a její slitiny [3].

V současnosti jsou těžkoobrobitelné materiály převážně využívány pro výrobu součástí kosmického a leteckého průmyslu (např. konstrukce letadel, motory), dále pro vojenskou techniku, jaderný průmysl, popřípadě potravinářský či medicínský průmysl.

2.1 Korozivzdorné oceli

Pojmem korozivzdorná ocel se rozumí legovaná ocel, která tvoří speciální samostatnou skupinu ocelí. Mezi hlavní legující prvky patří chrom *Cr* a nikl *Ni*. Při obsahu chromu v tuhém roztoku minimálně 11,5 % dochází ke skokovému nárůstu odolnosti proti elektrochemické korozi v oxidačním prostředí (tzv. pasivace). Obsah uhlíku *C* v korozivzdorných ocelích bývá nižší než 0,08 %, výjimkou jsou však chromové martenzitické oceli. Uhlík způsobuje snížení obsahu chromu v tuhém roztoku tvorbou karbidů. Difúzní rychlost uhlíku je vyšší než chromu, a proto může docházet k heterogenitě vznikem karbidů chromu, a tedy snížení obsahu chromu v tuhém roztoku. Z těchto důvodů dochází k tzv. mezikrystalové korozi způsobené precipitací karbidů po hranici zrn. Mezikrystalová koroze je častým jevem při svařování a vyskytuje se v teplotně ovlivněné oblasti. Pro zabránění vzniku tohoto jevu lze snížit obsah uhlíku v oceli, případně je možné přidat legující prvky, které mají vyšší afinitu k uhlíku než chrom. Mezi tyto prvky patří niob *Nb*, tantal *Ta* a titan *Ti*, které vytvářejí karbidy s uhlíkem a tyto oceli se nazývají stabilizované [5, 7, 8].

Obsah legujících prvků má zásadní vliv na výslednou strukturu a vlastnosti korozivzdorné oceli. Legující prvky lze rozdělit do dvou základních skupin, a to austenitotvorné a feritotvorné. Obsah chromu okolo 12 % uzavírá v binárním diagramu Fe-Cr oblast austenitu. To způsobí, že slitiny s vyšším obsahem chromu proto při chladnutí nepřekrystalizují a jejich struktura je feritická s vyloučenými karbidy. V případě nižšího obsahu chromu než 12 % se jedná o tzv. samokalitelné oceli a dochází k transformování austenitu na martenzit za běžných výrobních podmínek.

Mezi austenitotvorné prvky patří nikl *Ni*, uhlík *C*, dusík *N*, měď *Cu* a mangan *Mn*, které rozšiřují oblast austenitu a snižují teplotu martenzitické přeměny. Feritotvornými prvky jsou chrom *Cr*, molybden *Mo*, křemík *Si*, vanad *V*, hliník *Al*. Pro tyto skupiny prvků byly zavedeny pojmy chromový-ekvivalent a niklový-ekvivalent, jejichž výpočet umožňuje vyjádřit vliv chemického složení na strukturu korozivzdorné oceli v Schaefflerově-Delongově diagramu. Norma EN 10088 dělí dle vnitřní struktury korozivzdorné oceli na:

- feritické,
- martenzitické a vytvrditelné,
- austenitické,
- austeniticko-feritické (tzv. duplexní oceli) [5, 8].

2.1.1 Feritické korozivzdorné oceli

Feritické korozivzdorné oceli obsahují do 0,08 % uhlíku a až 30 % chromu. Běžně je však obsah chromu nižší (11 až 13 %), tím je způsobena nižší korozní odolnost. Oceli s vyšším obsahem uhlíku jsou při pokojových teplotách křehké, a proto se používají jako oceli žáruvzdorné. Feritické oceli nejsou kalitelné, protože při ohřevu nemění strukturu na austenitickou. Ohřevem a následným ochlazením těchto ocelí nedochází k objemovým změnám a i z těchto důvodů je vhodné je používat jako oceli žáruvzdorné. Nevýhodou těchto ocelí je křehnutí při teplotách 350 až 550 °C, což způsobuje jistá omezení v případě jejich svařování. Pro zjemnění struktury feritických ocelí je možné oceli tvářet a následně je tepelně zpracovávat (ohřev na 750 až 900 °C, následné ochlazení na vzduchu, případně v oleji). Tepelným zpracováním dosáhneme i vyrovnání obsahu chromu na hranicích zrn a tím snížení náchylnosti na mezikrystalovou korozi. Obrobitelnost feritických ocelí je podobná jako u nízko-legendovaných ocelí [5]. Při obrábění dochází k opotřebování hřebetu a vzniku výmolu na čele nástroje. Ocel má sklon k tvorbě nárůstku, tento jev lze do jisté míry odstranit zvýšením obsahu síry, avšak tím u oceli snížíme její odolnost proti korozi [7-9].

2.1.2 Martenzitické korozivzdorné oceli

Martenzitickou strukturu korozivzdorné oceli získáme, rychlým ochlazením z austenitické oblasti za předpokladu vyššího obsahu uhlíku 0,2 až 1 %. Obsah chromu je mezi 13 až 18 %. Častým jevem u popouštění ocelí na 350 – 550 °C je popouštěcí křehkost. Při popouštění na vyšší teploty dochází k difúzi chromu a zvyšuje se tak korozivzdornost. Martenzitické korozivzdorné oceli se nejčastěji obrábí v žíhaném stavu, až následně se provádí kalení obrobní [9]. Tyto oceli jsou často používané na stavbu vodních strojů, v potravinářském průmyslu, ve zdravotní technice, při výrobě čepelí pro nožičské účely a chirurgické nástroje [5,8].

2.1.3 Austenitické korozivzdorné oceli

Jedná se o nejžádanější skupinu korozivzdorných ocelí, a to z důvodu, že jejich korozní odolnost převyšuje martenzitické i feritické korozivzdorné oceli. Nejčastěji používanou austenitickou ocelí je typ tzv. 18/8, který obsahuje 18 % chromu a 8 % niklu. Lepších korozních vlastností lze získat legováním oceli 2 až 3 % molybdenu, tím je dosažena korozní odolnost proti kyselinám, a proto jsou tyto oceli často nazývány „kyselinovzdorné oceli“. U austenitických ocelí je rozpustnost uhlíku v austenitu 0,03 %, v případě vyššího obsahu uhlíku je nezbytné Cr-Ni oceli žíhat (jedná se o rozpouštěcí žíhání) při teplotě 1 050 °C a následně rychle ochladit

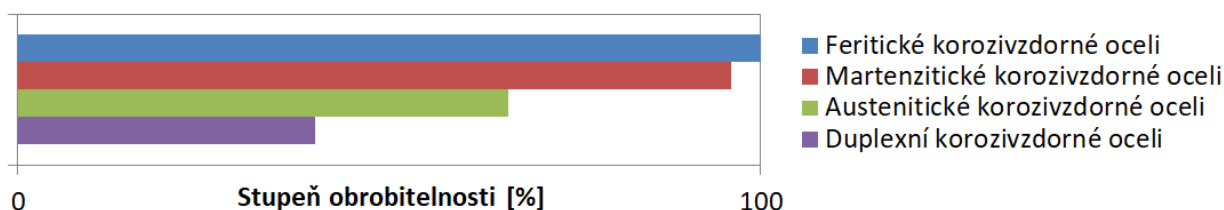
ve vodě, aby nedošlo k precipitaci karbidů. Oceli se dodávají nejčastěji ve stavu žíhaném naměkko. Ochlazení z žíhací teploty naměkko se provádí rychle, aby nedošlo ke snížení korozivzdornosti a obrobiteľnosti vzniklými tvrdými a abrazivními karbidy. Při obrábění austenitické oceli může vzniknout na povrchu obrobenej plochy vlivem působení plastické deformace vrstva vytvrzená za studena, která může mít tvrdost 400 – 500 HB v tloušťce cca 0,1 mm. Je vhodné volit pozitivní geometrii řezného nástroje, která snižuje plastickou deformaci, a tím tloušťku vytvrzené vrstvy a přispívá k stabilnějšímu procesu odebírání třísky a jejímu plynulejšímu odchodu z místa řezu. Vytvrzená vrstva může být příčinou odlupování povlaků a abrazivního opotřebenj řezného nástroje [5, 8, 9].

2.1.4 Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli

Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli neboli duplexní se označují oceli s 40 až 60 % feritu. U těchto ocelí je omezen obsah křemíku *Si* do 1 %, fosfor *P* do 0,035 % a síra *S* do 0,015 %. Duplexní korozivzdorné oceli obsahují 21 – 28 % chromu a 3,5 – 8 % niklu a dosahují vyšší meze kluzu než austenitické oceli. Tepelné zpracování je obdobné jako u austenitických ocelí. Po rozpouštěcím žíhání, případně po žíhání naměkko následuje rychlé ochlazení z důvodu vysokého podílu legujících prvků. Z tohoto důvodu jsou i teploty rozpouštěcího žíhání vyšší (cca 1 200 °C), aby nedocházelo ke vzniku heterogenních míst a předcházelo se mezikrystalové korozi. Kvůli vysokým hodnotám meze kluzu a meze pevnosti daných korozivzdorných ocelí je jejich obrobiteľnost poměrně špatná. Ke kladné změně obrobiteľnosti přispívá vyšší podíl feritu ve struktuře oceli. Odcházející třísky jsou pevné a mohou se zasekávat, což způsobuje nárůst řezných sil a zhoršení stability obrábění. Při obrábění dochází k opotřebenj nástroje plastickou deformací břitu a vzniku výmolu na čele nástroje, způsobené velkým množstvím tepla vznikajícího při oddělování obráběného materiálu. Duplexní korozivzdorné oceli jsou používány pro chemický, potravinářský a papírenský průmysl a pro zařízení vystavené účinkům kyselin a chlóru [5, 8, 9].

2.1.5 Obrobiteľnost korozivzdorných ocelí

Na korozivzdorné oceli je kladeno mnoho požadavků, mezi které patří odolnost proti korozi a pevnost v tahu. Tyto vlastnosti jsou však někdy v protikladu s dobrou obrobiteľností. Zlepšení obrobiteľnosti lze docílit přidáním síry, ta však snižuje vlastnosti, které od těchto ocelí vyžadujeme, a proto se tato možnost využívá pouze pro automatové ocele. Důležitým aspektem při obrábění korozivzdorných ocelí je tuhost stroje a stabilita obráběcího procesu, proto není vhodné volit příliš velký poloměr špičky nástroje, který zvyšuje nebezpečí vibrací. Z hlediska obrobiteľnosti a kvality obrobenej plochy je výhodné obrábět oceli ve stavu žíhaném naměkko a tažené zastudena, zvláště pro austenitické a feritické oceli. Obrobiteľnost jednotlivých korozivzdorných ocelí se může výrazně lišit i v rámci jedné skupiny, proto digram na obr. 2.1 zobrazuje pouze přibližné informace o srovnání obrobiteľností korozivzdorných ocelí [5, 8].



Obr. 2.1 Relativní obrobiteľnost korozivzdorných ocelí - podle [5].

2.2 Titan a jeho slitiny

Titan s vysokou čistotou může dosáhnout pevnosti v tahu až 250 MPa a tažnosti až 60 %. Jedná se o polymorfní kov získávaný z ilmenitu (oxid železato-titaničitý), případně z rutilu (oxid titaničitý). Nízkoteplotní modifikace α je stabilní do teploty 882,5 °C a krystalizuje v šesterečné soustavě. Následně překrystalizuje do modifikace β , která krystalizuje v krychlové prostorově středěné soustavě (BCC) [3, 8, 10].

Titan se vyznačuje svojí dobrou odolností proti korozi, která se uplatňuje v chemickém průmyslu, potravinářském průmyslu a v kontaktu s mořskou vodou i s jiným reaktivním prostředím. Jako konstrukční materiál se používá kvůli své nízké měrné hmotnosti a vysoké měrné pevnosti, která se přibližuje pevnosti oceli. Kvůli zdravotní nezávadnosti je možné jej použít i ve farmaceutickém průmyslu a pro chirurgické využití (např.: chirurgické nástroje, šrouby, protézy, zubní implantáty). Má nízký součinitel teplotní roztažnosti a nízkou tepelnou vodivost, která v kombinaci s vysokým součinitelem tření způsobuje vznik velkého množství tepla při obrábění. Přísadové prvky mají velký vliv na vlastnosti titanu a v jeho obou modifikacích se rozpouštějí částečně nebo úplně. Přísadové prvky se dělí do třech skupin podle vlivu na teplotu fázové přeměny $\alpha \leftrightarrow \beta$:

- α stabilizátory (Al, O, N, C) - teplotu fázové přeměny zvyšují,
- β stabilizátory (V, Nb, Mo, Ta) - teplotu snižují a stabilizují tuhý roztok β , (Cu, Si, Cr, Mn, Fe, Co, Ni) – probíhá eutektoidní přeměna,
- neutrální prvky (Sn, Zr) - nemají vliv na fázovou teplotu [3, 5, 8].

Podle struktury, která vznikne pomalým ochlazením z žhací teploty, se titanové slitiny dělí do následujících skupin [8]:

- slitiny α ,
- slitiny pseudo α (obsahující maximálně 6 hm. % fáze β),
- slitiny $\alpha + \beta$,
- slitiny pseudo β (obsahující malé množství fáze α),
- slitiny β .

2.2.1 Slitiny α a pseudo α

Slitiny α obsahují stabilizační prvek hliník Al, ostatní stabilizační prvky α modifikace představují nečistoty, tendencí je obsah těchto prvků minimalizovat, dále slitiny obsahují neutrální prvky cín Sn, zirkon Zr. Slitiny α mají velkou tepelnou stabilitu, vysokou pevnost v tahu při pokojové i zvýšené teplotě. Vyznačují se dobrou houževnatostí i za velmi nízkých teplot a odolností proti křehkému lomu [3].

Slitiny pseudo α obsahují, kromě stabilizačního prvku hliníku i stabilizační a zpevňující prvky fáze β . Obsah β nepřesahuje 6 hmot. % a mají větší plasticitu a o 10 – 20 % vyšší pevnost než slitiny α [8].

2.2.2 Slitiny $\alpha+\beta$

Slitiny obsahují prvky stabilizující fázi α i β a jedná se o nejvíce rozšířenou a používanou skupinu titanových slitin a např. slitina Ti-6Al-4V je nejvíce používanou slitinou a vyznačuje se pevností v tahu až 1 125 MPa. Jejich tvařitelnost v žháném stavu je lepší než je tomu u slitin α a pseudo α . Odolnost proti únavovému namáhání je lepší, avšak svařitelnost a odolnost proti creepu je horší než u slitin α . Tyto slitiny lze dále tepelně zpracovávat, čímž je docíleno vyšších pevnostních charakteristik

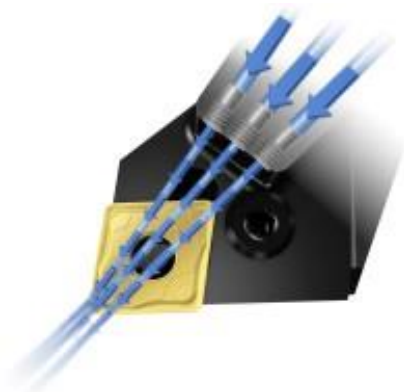
i za zvýšených teplot, a proto je možné je uplatnit i při teplotách 350 – 400 °C. Běžné využití těchto slitin je pro silově zatížené součásti v leteckém průmyslu (lopatky turbín, části podvozků či spojovací materiál) i pro sportovní zařízení a zubní implantáty [3, 8].

2.2.3 Slitiny β a pseudo β

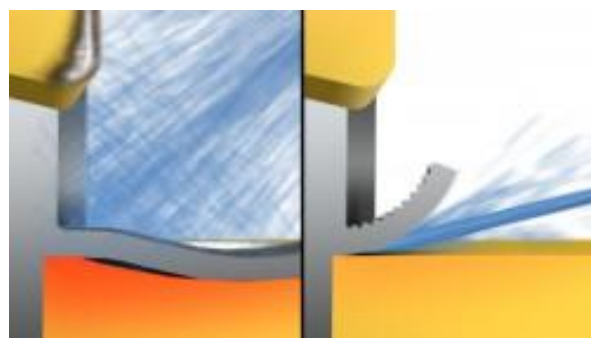
Ve slitinách je obsaženo velké množství přísadových prvků stabilizující fázi β , tyto prvky však zvyšují hmotnost daných slitin, protože mají vysokou měrnou hmotnost. Přísadové prvky mají vysokou teplotu tání a jejich výroba v požadované kvalitě je nákladná, a to ovlivňuje i vyšší cenu těchto slitin titanu. Mezi jejich kladné vlastnosti patří vysoká odolnost proti korozi a vysoká tvařitelnost při pokojové teplotě, kterou ovlivňuje krychlová prostorově středěná mřížka (BCC) fáze β . Pevnostní charakteristiky mají při pokojové teplotě srovnatelné se slitinami $\alpha + \beta$, avšak za zvýšených teplot jsou horší. Jejich předností je schopnost velkého vytvrzování, při které můžou slitiny dosáhnout pevnosti v tahu až 1 400 MPa [3, 8].

2.2.4 Obrobitelnost titanových slitin

Titan a jeho slitiny jsou považovány za těžkoobrobitelné materiály, a to hned z několika důvodů, které vyplývají z fyzikálních, chemických a mechanických vlastností. Materiál se nejčastěji obrábí ve stavu žíhaném naměkko nebo po umělém stárnutí. Kvůli nízkému modulu pružnosti má obrobek tendenci, se při vystavení tlaku od nástroje deformovat, čímž dochází k nestabilnímu odebrání třísky a zhoršení tak kvality povrchu. Lepší obrobitelnosti je dosaženo při obrábění slitin α nežli slitin β , což souvisí s vysokými pevnostními charakteristikami slitin α i za zvýšených teplot. Při procesu obrábění vzniká velké množství tepla způsobeného špatnou tepelnou vodivostí slitin titanu a špatnými třecími vlastnostmi [10]. Vysoká teplota na čele nástroje a chemická afinita titanu k materiálům řezných nástrojů způsobuje velké opotřebení a klade důraz na řezné nástroje. Ty musí splňovat vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, odolnost proti plastické deformaci, houževnatost a v neposlední řadě odolnost proti difúznímu opotřebení. Zpevňováním slitin titanu dochází, že při obrábění je velký úhel střížné roviny, který následně způsobí malý kontakt třísky s čelem nástroje a velké teplotní namáhání ostří řezného nástroje. Je nezbytné při soustružení titanu a jeho slitin zajistit bohatý přísun procesní kapaliny, viz obr. 2.2, kde je zobrazena technologie přesného přívodu procesní kapaliny od firmy Sandvik Coromant, která snižuje kontaktní plochu třísky a čela nástroje a chladí místo řezu (viz obr. 2.3) [11]. Další možností snížení vysoké teploty



Obr. 2.2 CoroTurn® HP - Pokroková technologie přívodu řezné kapaliny [11].



Obr. 2.3 Konvenční (vlevo) a přesný přívod procesní kapaliny (vpravo) [11].

při obrábění je použít nekonvenční médium, například tekutý dusík tzv. kryogenní chlazení, které výrazně snižuje koeficient tření a přispívá tak ke zvýšení trvanlivosti nástroje [12]. Z pohledu geometrie nástroje je vhodné používat kladný úhel čela a menší úhel nastavení hlavního ostří nástroje ($\kappa_r = 45^\circ$ a menší). Při použití menšího úhlu nastavení hlavního ostří je docíleno menší tloušťky třísky a větší šířky, což má za následek rozložení tepelného zatížení na větší délce ostří. [5, 8, 13, 14].

2.3 Superslitiny

Superslitiny jsou žárupevné a žáruvzdorné slitiny často označovány HRSA (Heat resistant super alloys). Vyznačují se svojí pevností a tvrdostí za vysokých teplot, které mohou přesáhnout hodnotu 70 % teploty tavení daného materiálu, vysokou odolností proti creepu a vysokou odolností proti korozi a oxidaci i při teplotách nad 650°C . Tyto vlastnosti slitin jsou proto vhodné pro aplikaci v kosmickém, leteckém (motory), těžebním, lodním a energetickém průmyslu, uplatnění se najde i v medicínském průmyslu např. kloubní implantáty.

Superslitin je velké množství a jejich fyzikální vlastnosti jsou odlišné skrz jejich chemické složení, a proto se dělí do tří skupin podle obsahu dominantního prvku:

- slitiny na bázi železa,
- slitiny na bázi niklu,
- slitiny na bázi kobaltu.

Slitiny na bázi niklu tvoří největší podíl produkce superslitin a využívají se převážně pro výrobu součástí leteckých motorů, kde představují více než 50 % hmotnosti leteckého motoru a do budoucna se má jejich použití zvýšit. Slitiny na bázi železa byly vyvinuty z austenitických korozivzdorných ocelí, to ovlivnilo jejich obrobitelnosti, která je blízká obrobitelnosti korozivzdorných ocelí. Mezi vlastnosti některých slitin na bázi železa patří velmi nízká tepelná roztažnost, proto jsou vhodné pro výrobu dílu např. hřídelí a pouzder. Slitiny na bázi kobaltu jsou tepelně nejodolnější a mají vyšší odolnost proti oxidaci a korozi než slitiny niklu. Jejich použití je v leteckých motorech a turbínách v místech s nejvyšší teplotou a převážně pro výrobu kloubních implantátů díky vysoké korozní odolnosti. Tabulka 2.1 zobrazuje přehled nejběžnějších superslitin dle jejich báze [3, 8, 15].

Tab. 2.1 Přehled obchodních značení nejběžnějších superslitin [15].

Slitiny na bázi niklu	Slitiny na bázi železa	Slitiny na bázi kobaltu
Inconell 718	Greek Ascoloy	Haynes 25
Inconell 706	A286	Stellite 21
Inconell 625	Incoloy 909	Stellite 31
Hastelloy S		
Monel 401		
Nimonic PK33		
Udimet 720		
Incoloy 925		

2.3.1 Superslitiny a jejich obrábitelnost

Superslitiny jsou specifické svými vlastnostmi, mezi které patří vysoký elektrický odpor, vysoká odolnost proti korozi, oxidaci a opalu, vysoká pevnost a houževnatost.

Niklové slitiny lze rozdělit dle jejich použití na konstrukční slitiny, slitiny niklu se zvláštními fyzikálními vlastnostmi, žáruvzdorné a žárupevné slitiny niklu. Slitiny niklu mají podobně jako austenitické korozivzdorné oceli austenitickou matici, která způsobuje při jejich zpracování nárůst tvrdosti při obrábění. Tlak působící na obrobenou plochu zapříčiní vznik deformované vrstvy s vysokým zbytkovým napětím, která zhoršuje obrábitelnost materiálu. Vzniku deformované vrstvy při obrábění lze zabránit tvářením za studena, případně je vhodné polotovary válcovat za tepla, nebo žíhat. Materiály se schopností vytvrzovacího stárnutí dosahují při dokončovací obrábění nejlepší povrchové drsnosti právě ve vytvrzeném stavu. Niklové i kobaltové slitiny kladou vysoké nároky na obrábění, materiály si zachovávají vysoké hodnoty mechanických vlastností i za vysokých teplot. Nízká tepelná vodivost materiálu způsobuje velké akumulování tepla v nástroji, v kombinaci s velkými řeznými silami dochází k deformačnímu opotřebení břitu (viz obr. 2.4). Řezný nástroj je opotřebován karbidy obsaženými ve struktuře obráběného materiálu a dochází tak k abrazivnímu opotřebení (výmol na čele a primární hřbetní rýha viz obr. 2.4) a k difúznímu opotřebení způsobeného afinitou prvků [17]. Je nezbytné při soustružení použít procesní kapalinu nejlépe s přesným přívodem do místa řezu pro snížení tepelného namáhání nástroje a lepšího odvodu třísky (přívod alespoň 20 l/min procesní kapaliny s tlakem 70 bar) viz obr. 2.5 [15]. Řezné podmínky vzhledem k specifickým vlastnostem superslitin je doporučeno volit obvykle nižší než u soustružení korozivzdorných ocelí (převážně nižší řeznou rychlost v_c a hloubku záběhu hlavního ostří a_p) [3, 8, 16].



Obr. 2.4 Typické opotřebení nástroje při soustružení superslitin [15].



Obr. 2.5 Použití přesného přívodu procesní kapaliny [15].

3 KALENÉ OCELI

Kalení ocelí se provádí za účelem dosažení nerovnovážných stavů oceli a zlepšení mechanických vlastností daného materiálu jako např. tvrdost, odolnost proti abrazivnímu opotřebení a meze únavy. Jedná se o tepelné zpracování oceli představující ohřev nad teplotu A_{c3} popř. A_{c1} , výdrž na dané teplotě a ochlazení dostatečnou rychlostí za vzniku martenzitické struktury, případně bainitické struktury. Kalené oceli se dle standardů ISO řadí do skupiny H, tato skupina zahrnuje oceli s tvrdostí 45-68 HRC, ale také sem spadají tvrzené litiny. Vysoká tvrdost způsobuje, že jsou tyto materiály obtížně obrobitelné a při jejich obrábění dochází ke vzniku velkého množství tepla a působí abrazivně na břit nástroje. Kalení se dělí dle výchozí struktury a způsobů ochlazování viz obr. 3.1 [8, 18, 19].



Obr. 3.1 Rozdělení způsobů kalení.

3.1 Základní terminologie

3.1.1 Kalitelnost

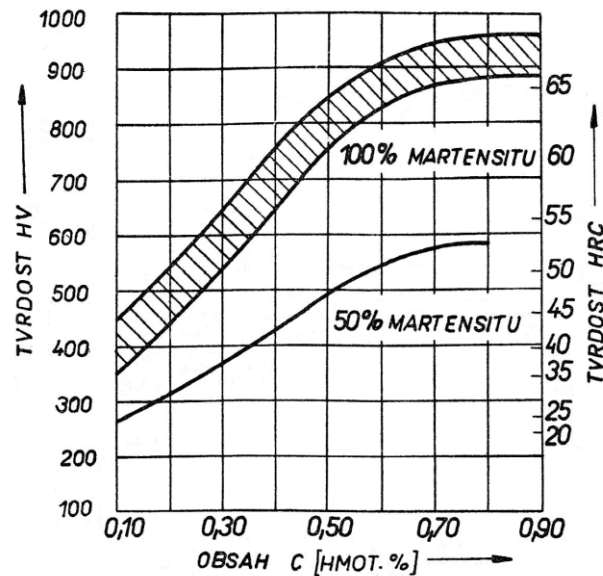
Kalitelnost oceli nejvýznamněji ovlivňuje obsah uhlíku a jedná se o schopnost oceli dosáhnout vyšší tvrdosti pomocí tepelného zpracování. Ke zvýšení tvrdosti dojde vznikem martenzitické struktury ochlazením z kalící teploty nadkritickou rychlostí ochlazování. Oceli s nízkým obsahem uhlíku nedosahují vysoké tvrdosti, a proto se za dobře kalitelné oceli považují oceli s obsahem uhlíku nad 0,35 % a oceli s obsahem uhlíku pod 0,2 % jsou považovány za nekalitelné. Legující prvky mají vliv na kalitelnost a mohou hranici obsahu uhlíku posouvat k nižším hodnotám [8, 19].

3.1.2 Zakalitelnost

Zakalitelnost lze hodnotit nejvyšší hodnotou tvrdostí oceli dosažené pomocí kalení. Na maximální hodnotu tvrdosti má vliv obsah uhlíku v austenitu (viz obr. 3.2), chemické složení a mimo jiné i stav austenitu před kalením (homogenita, velikost zrn) [8, 19].

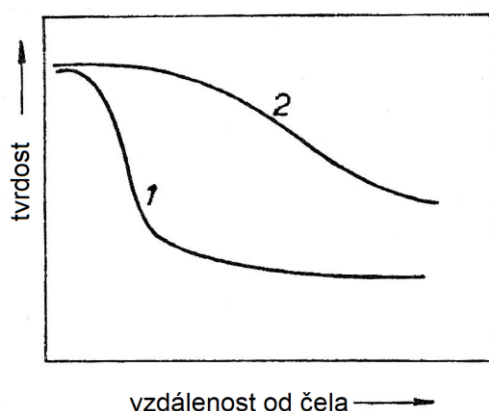
3.1.3 Prokalitelnost

Jako prokalitelnost se označuje schopnost oceli dosáhnout po kalení v určité hloubce pod povrchem hodnoty tvrdosti, která odpovídá zakalitelnosti oceli při 50 % martenzitu ve struktuře. Hloubka prokalené vrstvy úzce souvisí s tvarem ARA diagramu, který ovlivňují legující prvky (vyjma hliníku a kobaltu) a mohou posunout počátek a konce přeměny austenitu k delším časům, a tím tedy umožnit prokalení do větší hloubky. Na rychlost ochlazování součásti na povrchu má vliv kalící prostředí, avšak rychlost ochlazování pod povrchem ovlivňuje tepelná vodivost daného materiálu, a proto se rychlost ochlazování směrem do středu součásti snižuje a nemusí dojít k zakalení celého průřezu.

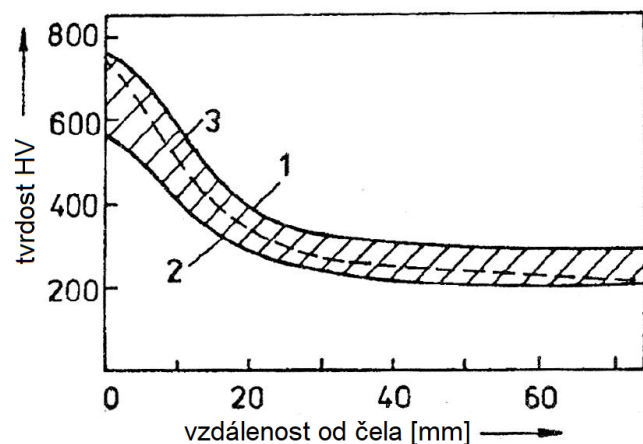


Obr. 3.2 Vliv uhlíku na tvrdost martenzitu [20].

Prokalitelnost je významnou materiálově-technologickou charakteristikou a pro její určení se používá nejčastěji čelní zkouška prokalitelnosti (Jominyho zkouška, ČSN 42 0447). Podstata zkoušky spočívá v definovaném ochlazování čela vzorku, který má normou stanovené rozměry. Vzorek je před ochlazováním ohřát na kalící teplotu s výdrží po dobu 30 minut. Po vychladnutí se na válcové ploše vzorku vybrousí dvě protilehlé plošky do hloubky 0,4 mm, na kterých se následně změří tvrdost v předepsaných vzdálenostech od ochlazovaného čela. Hodnoty tvrdosti v měřených bodech lze vynést do diagramu a výsledkem je tzv. křivka prokalitelnosti (závislost tvrdosti na vzdálenosti od ochlazovaného čela) viz obr. 3.3, kde je porovná prokalitelnost uhlíkové a legované oceli. Křivky prokalitelnosti však nejsou stejné pro různé tavby dané značky oceli, to je způsobeno rozsahy chemického složení. Proto je důležité provést čelní zkoušku prokalitelnosti vícekrát a její minimální a maximální hodnoty zanést do diagramu a vznikne tzv. pás prokalitelnosti viz obr. 3.4 (1,2 – jsou min. a max. hranice pásu, 3 konkrétní křivka prokalitelnosti) [8, 19, 20].



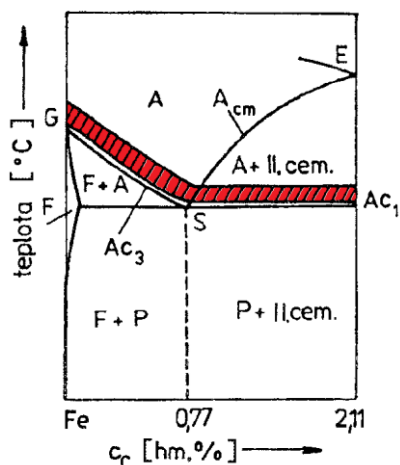
Obr. 3.3 Schématické porovnání křivek prokalitelnosti (1) uhlíkové oceli a (2) legované oceli [8].



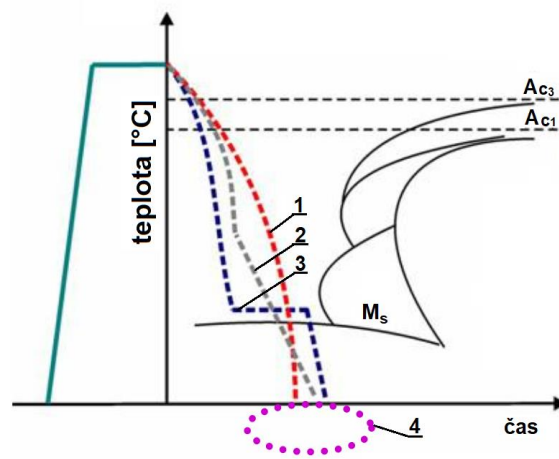
Obr. 3.4 Pás prokalitelnosti oceli ČSN 14 240 [8].

3.2 Způsoby kalení ocelí

Způsob kalení a jeho volba závisí především na požadovaných vlastnostech kaleného předmětu, rozměrech, tvaru součásti a druhu použité oceli. Základní rozdělení způsobu kalení je dle získané výsledné struktury, a to na martenzitické a bainitické. Kalení spočívá v ochlazení součásti z kalících teplot (viz obr. 3.5), které se volí nejčastěji 30 – 50 °C nad teplotou A_{c3} a A_{c1} . Při kalení z teploty A_{cm} dochází k rozpouštění sekundárního cementitu, následného zhrubnutí zrn austenitu a po zakalení se dostaví vyšší hodnoty vnitřního pnutí, četnější výskyt mikrotrhlin a výsledná struktura je měkčí a méně teplotně stabilní [8, 20].



Obr. 3.5 Pásmo kalících teplot v diagram Fe- Fe_3C [8].



Obr. 3.6 Schematické znázornění způsobů martenzitického kalení - podle [21].

3.2.1 Martenzitické kalení

Martenzitické kalení spočívá v ochlazování oceli z kalící teploty (viz obr. 3.5), kde se po zakalení ve struktuře podeutektoidních ocelí vytvoří martenzit s podílem zbytkového austenitu a u nadeutektoidních ocelí se ve výsledné struktuře mimo již zmíněný martenzit vyskytuje vyšší podíl zbytkového austenitu a nerozpuštěný sekundární cementit. Obsah sekundárního cementitu v kalené struktuře zvyšuje odolnost proti opotřebení. Rychlost ochlazování povrchu i jádra součásti musí být nadkritická a ochlazovací křivky minou křivky počátku difúzního rozpadu austenitu (viz obr. 3.6). Martenzitické kalení se dělí na nepřetržitě a přetržitě, které se dále ještě dělí na lomené, termální a kalení se zmrazováním (viz obr. 3.1). Nehledě na způsob martenzitického kalení, je nezbytné provést po kalení popouštění zakalených součástí [8, 20, 22].

1. **Kalení nepřetržitě** – Nazývané též jako přímé kalení spočívá v ohřevu na kalící teplotu (viz obr. 3.5), výdrž na této teplotě z důvodu homogenizace austenitu a následně plynulé ochlazení nadkritickou rychlostí (viz obr. 3.6 křivka 1). Jedná se o nejjednodušší způsob kalení a dosahuje se vysoké tvrdosti kalených součástí, avšak v součástech vznikají velká vnitřní pnutí a deformace, které neumožňují tímto způsobem kalit tvarově složitě součásti, jelikož by hrozilo jejich deformování případně praskání [20, 22].
2. **Kalení lomené** – Tímto způsobem kalení je docíleno snížení rizika vzniku strukturálních pnutí, deformace a je možné jej uplatnit i u tvarově složitějších součástí. Provádí se rychlým ochlazením (např. ve vodě), aby nedošlo k difúznímu rozpadu austenitu. Následně se rychlost ochlazování zpomalí změnou ochlazovacího prostředí (např.: ochlazování v oleji). Pro úspěšné

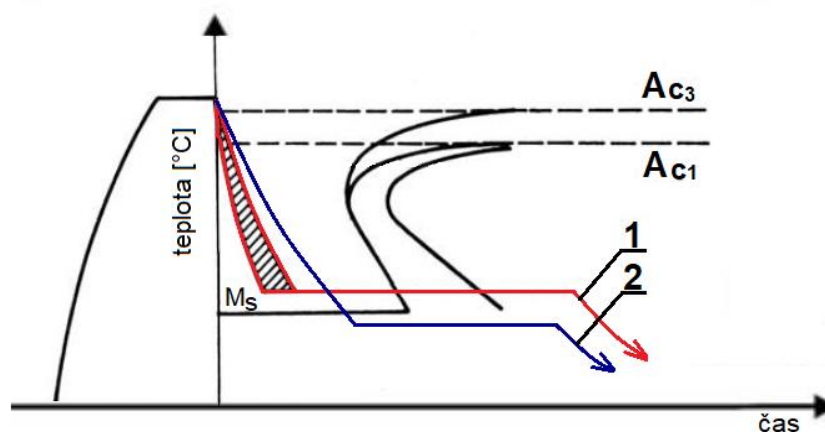
provedení lomeného kalení je nezbytné znát příslušný ARA diagram dané oceli pro stanovení výdrže v prvním kalícím prostředí. Průběh kalení je schematicky znázorněn viz obr. 3.6 (křivka 2) [8, 19, 20].

3. **Kalení termální** – Termálním kalením je docíleno snížení pnutí už v průběhu ochlazování z kalící teploty. Ochlazování je nejdříve provedeno v lázni (nejčastěji lázeň roztavené soli) o teplotě lehce vyšší než je teplota M_s kalené oceli. Prodlevou na dané teplotě dojde k vyrovnání teplot v celém objemu součásti, avšak prodleva nesmí být příliš dlouhá, aby nedošlo k přeměně na bainit. Po vyrovnání teplot následuje ochlazování pod teplotu M_s zpravidla na vzduchu. Průběh ochlazovací křivky je na obr. 3.6 (křivka 3) a tento způsob je vhodný pro tvarově složité a členité díly z legovaných ocelí a pro tenkostěnné díly [8, 20, 22].
4. **Kalení se zmrazováním** – Je vhodné pro ocele s vysokým obsahem uhlíku a pro legované ocele, kde po zakalení zůstává ve struktuře velký obsah zbytkového austenitu. Zmrazování je další fází ochlazování, kde se ochlazuje součást pod teplotu M_f (viz obr. 3.6 křivka 4) přesněji na teplotu -60 až -70 °C. Zmrazování musí následovat ihned po zakalení, aby nedošlo ke stabilizaci zbytkového austenitu. Tím je dosaženo snížení zbytkového austenitu ve struktuře a stabilizace rozměrů. Tento způsob je vhodný pro dílce pracující při nízkých teplotách, kde by mohlo docházet k samovolné přeměně zbytkového austenitu na martenzit, doprovázené deformací dílu. Dále pro díly s požadovanou rozměrovou stálostí (např.: měřicí nástroje, valivá ložiska) [19, 20, 22].

3.2.2 Bainitické kalení

Při bainitickém kalení se ochlazovací křivka protne s křivkou B_s , a tím dochází k přeměně austenitu na bainit, který se vyskytuje ve struktuře zakalené součásti. Ochlazování probíhá buď plynule tzv. nepřetržitě, nebo izotermicky při konstantní teplotě [20, 22].

1. **Nepřetržitě bainitické kalení** – Tento způsob kalení není příliš častý a je možné jej provádět pouze u ocelí, které mají bainitickou oblast vysunutou výrazně doleva. Výsledek kalení je bainitická a martenzitická struktura, která se vždy následně popouští pro odstranění martenzitu.
2. **Izotermické bainitické zušlechťování** – Obdobně jako v případě termálního kalení je ochlazování prováděno v lázni o teplotě vyšší než M_s (350 až 400 °C). V této lázni je kalená součást ponechána až do ukončení bainitické přeměny a následně je dochlazena na vzduchu (viz obr. 3.7 křivka 1). Takto tepelně zpracované součásti se jen zřídka popouštějí.



Obr. 3.7 Diagram IRA – bainitické zušlechťování a kalení - podle [20].

3. Izotermické bainitické kalení – Jeho podstatou je ochlazení součásti v lázni s teplotou těsně pod M_s (viz obr. 3.7 křivka 2) Výslednou strukturu kalené součásti potom tvoří směs martenzitu, bainitu a zbytkového austenitu. Tuto strukturu je možné získat i nepřetržitým kalením oceli s vhodným tvarem diagramu ARA [8, 20, 22].

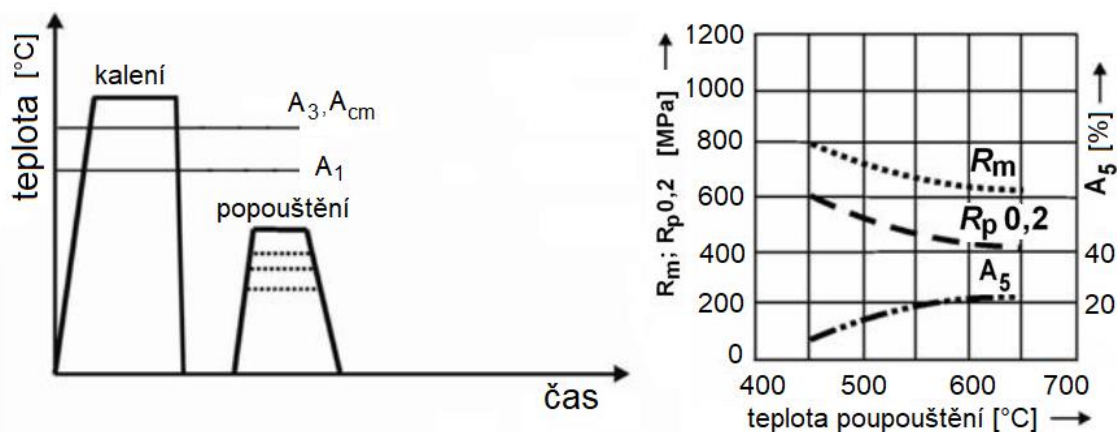
3.3 Popouštění ocelí

Ocel zakalená na martenzitickou případně bainitickou strukturu má vysokou tvrdost, ale i vnitřní pnutí a značnou křehkost. Popouštěním dojde ke snížení vnitřních pnutí, křehkosti i tvrdosti, avšak ke zvýšení houževnatosti struktury. Popouštění se provádí zpravidla ihned po zakalení součásti, a to ohřevem na popouštěcí teplotu, která je nižší než teplota A_{c1} , výdrží na dané teplotě (zpravidla 2 hodiny) a následném pomalém ochlazení nejčastěji v peci, případně na vzduchu.

Po zakalení má martenzit jehlicovitý tvar tzv. tetragonální martenzit. Při popouštěcích teplotách 80 až 200 °C dochází uvnitř jehlic martenzitu k vylučování uhlíku v podobě přechodového karbidu. Martenzit zaznamená mírné snížení tvrdosti, avšak výraznějším snížením křehkosti a toto stádium martenzitu se označuje jako kubický martenzit. Při teplotách 200 až 300 °C dochází k rozpadu zbytkového austenitu na bainit a zároveň při teplotách 200 až 450 °C martenzit se zcela rozpadá na ferit a cementit a vzniká tzv. jemná sorbitická struktura. Mezi teplotami 450 °C a A_{c1} vzniká tzv. hrubá sorbitická struktura, která se vyznačuje pevností a vysokou houževnatostí.

Popouštění se dělí podle výšky popouštěcí teploty, která zásadně ovlivňuje rozsah strukturních změn a s tím související změny mechanických vlastností na dvě skupiny a tedy na:

1. Popouštění za nízkých teplot (asi do 350 °C) snižuje pnutí po zakalení a podíl zbytkového austenitu. Dochází ke zvýšení houževnatosti a rozměrové stabilitě. Popouštěcí teploty jsou nejčastěji v rozmezí 100 až 300 °C. Popouštění za nízkých teplot se používá zpravidla pro nástrojové ocele, součásti po cementaci a pro součásti povrchově kalené.
2. Popouštění za vysokých teplot (nad 350 až 700 °C) zpravidla je rozmezí popouštěcích teplot 400 až 650 °C. Při použití těchto popouštěcích teplot je dosaženo optimální kombinace pevnostních vlastností, houževnatosti a plasticity (R_m , $R_{p0,2}$, A_5) viz obr. 3.8. Struktura je sorbitická (feriticko-cementitická struktura), která dodává potřebnou houževnatost a pevnost oceli [8, 19-22].



Obr. 3.8 Schéma tepelného zpracování (vlevo) a zušlechťovací diagram (vpravo) - dle [21].

3.3 Zušlechťování

Zušlechťování je tepelné zpracování, které se skládá z kombinace martenzitického kalení, po kterém následuje popouštění za vysokých teplot. Účelem tohoto zpracování je dosáhnout vysoké R_m , R_e , odolnosti proti únavě materiálu a houževnatosti. Výsledná struktura je sorbitická, která je výhodnou kombinací mechanických vlastností. Zušlechťování se používá pouze pro ocele, u kterých jsou zaručeny hranice chemického složení. V případě kolísání obsahu uhlíku a legujících prvků není zaručena reprodukovatelnost výsledků. Zušlechťováním je dosaženo vyšších hodnoty vrubové houževnatosti, tažnosti a R_e než jakých hodnot jsme schopni dosáhnout u oceli v normalizovaném stavu. Schéma tepelného zpracování a zušlechťovacího diagramu lze vidět na obr. 3.8, který znázorňuje vliv popouštěcí teploty na mechanické vlastnosti [8, 20, 21].

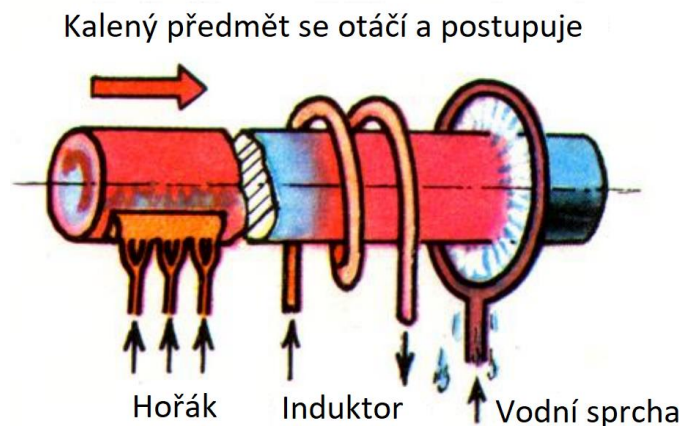
3.4 Povrchové kalení

Povrchové kalení je možné považovat za samostatný technologický postup, u kterého je podstatou rychlý ohřev povrchové vrstvy kalené součásti do požadované hloubky na teplotu austenitizace. Po ohřevu musí následovat okamžitě prudké ochlazení nadkritickou rychlostí, nejčastěji vodou. Martenzitická struktura vznikne v povrchové vrstvě, která byla austenitizována. Struktura pak hlouběji pod povrch přechází přes smíšené pásmo až do jádra, které nebylo teplotně ovlivněno a nedošlo k strukturálním změnám, a proto si zachovalo původní vlastnosti. Je tedy vhodné před povrchové kalení zařadit např. normalizační žíhání nebo zušlechťování, protože si jádro povrchově kalené součásti zachová vlastnosti předchozího tepelného zpracování. Velké strukturální rozdíly mezi jádrem a povrchovou vrstvou vedou k vnitřnímu pnutí, které lze snížit okamžitým nízkoteplotním popouštěním (popouštěcí teploty přibližně 150 – 250 °C). Podmínkou povrchového kalení je dobrá prokalitelnost, kalitelnost oceli a vyhovující mechanické vlastnosti jádra součásti. U součástí povrchově kalených je požadována vysoká odolnost povrchu proti opotřebení, zvýšená odolnost proti dynamickému namáhání a vysoká mez únavy povrchu. Povrchové kalení dle způsobu ohřevu povrchové vrstvy se dělí:

1. Povrchové kalení plamenem – K ohřevu je použit plamen hořáku, ve kterém se spaluje kyslík s hořlavým plynem (např. acetylen, metan, propan atd.) a teplota plamene je v rozmezí 2 550 až 3100 °C. Ohřev na kalící teplotu je velmi rychlý a doba výdrže je krátká, takže nedochází k růstu austenitického zrna (to znamená, že výsledná martenzitická struktura má jemné zrna). Povrchové kalení plamenem lze provádět způsobem postupným, případně jednorázovým. Při postupném ochlazení viz obr. 3.9 je součást současně ohřívána na kalící teplotu a v těsné blízkosti hořáku i ochlazená vodní sprchou. Jednorázové povrchové kalení spočívá v ohřevu celého předepsaného kaleného povrchu a následném ochlazení vodní sprchou, případně ponorem do vodní lázně. Povrchové kalení plamenem je vhodné pro součásti velkých rozměrů, jednoduchých tvarů a i pro malé série. Minimální tloušťka kalené vrstvy při postupném kalení činí asi 1,5 mm a při jednorázovém kalení asi 3 mm.
2. Povrchové kalení indukční – Elektricky vodivé kalené součásti jsou ohřívány indukovanými proudy z induktoru. Induktor je cívka o malém počtu závitů tvaru spirály, smyčky vyrobené z měděné trubky, kterými prochází chladící voda. Induktorem, ve kterém je vložena kalená součást

prochází střídavý proud o frekvenci (1 000 Hz až 2 MHz). Proudová hustota indukovaného proudu není v průřezu kalené součásti stejná a směrem k povrchu se zvětšuje. Hloubka průniku indukovaného proudu je nepřímo úměrná frekvenci střídavého proudu, což znamená, že s vyšší frekvencí je hloubka průniku proudu do kalené součásti menší. Tloušťka ohřáté vrstvy na austenitickou teplotu se běžně pohybuje od 1 až 10 mm. Stejně jako tomu bylo v případě povrchového kalení plamenem i zde se ohřev a následné ochlazení provádí jednorázovým a postupným způsobem. Jednorázový způsob spočívá v ohřevu celého povrchu součásti na kalící teplotu a následné ochlazení vodní sprchou, případně vodní lázní. Při postupném způsobu kalení je v těsné blízkosti induktoru umístěna vodní sprcha, která součást neprodleně po ohřátí ochladí (viz obr. 3.9). Indukční kalení je vhodné převážně pro menší plochy a velké série výrobků z důvodu investičních nákladů. Výhodou indukčního ohřevu je snadná automatizace procesu a malé okujení povrchu.

3. Povrchové kalení laserem – Laserové zařízení má vysoký výkon a je schopné bezkontaktně dodat povrchu kalené součásti velmi rychle značné množství energie. Rychlost ohřevu kaleného povrchu je v řádech 10^4 až 10^6 °C/s. Tepelně ovlivněná oblast, její hloubka a velikost závisí na době působení a hustotě energie laserového svazku. Hloubka tepelně ovlivněné vrstvy je od 0,1 do 2 mm, na výslednou hodnotu hloubky má vliv parametr zařízení a vstupní materiál. Teplota ohřevu nepřesahuje teplotu tavení a ochlazení je prováděno samovolně vedením tepla do neohřátého materiálu. Ochlazení je tedy plynulé a nedochází výraznému vnitřnímu prnutí. Laserové kalení je možné použít pro běžně kalitelné oceli i nízkouhlíkové oceli [8, 19, 20].



Obr. 3.9 Schématické znázornění postupného povrchového kalení plamenem (vlevo) a postupného indukčního povrchového kalení (vpravo) - podle [19].

3.5 Kalicí prostředí

Optimální ochlazovací prostředí umožní ochlazovat součást těsně nadkritickou rychlostí, jelikož příliš rychlé ochlazení vede ke zvýšení vnitřního pnutí a rizika deformace a vzniku prasklin, proto je volba vhodného kalicího prostředí zásadní. Ochlazovací účinky kalicího prostředí ovlivňuje jeho tepelná vodivost, měrné a výparné teplo a viskozita. Intenzita ochlazování je hlavním kritériem pro hodnocení a výběr kalicího prostředí, ale důležitými faktory jsou i ekologická a fyziologická nezávadnost, omyvatelnost a odolnost proti oxidaci, stárnutí a tepelnému zatížení.

Nejintenzivnější kalicí prostředí je voda, která má největší účinnost, a proto je možné zakalit i nelegované uhlíkové oceli. Kvůli velké ochlazovací rychlosti však dochází k velkým vnitřním pnutím a vzniku trhlin. Ochlazovací účinnost lze snížit zvýšením teploty vody a naopak zvýšit ochlazovací účinnost lze jejím pohybem nebo přidáním solí případně louhu (NaCl , KNO_3 , NaOH). Regulaci ochlazovací účinnosti přinášejí i polymery rozpustné ve vodě (polyalkylenglykol, polyakrylat atd.).

Přibližně 3x až 4x nižší ochlazovací schopnost oproti vodě mají oleje. Výhodou kalení do oleje je menší vnitřní pnutí (použití pro legované ocele), ale nevýhodou je riziko vznícení lázně a negativní ekologický vliv.

Nejmírnějším kalicím prostředím je vzduch, při kterém je ochlazování plynulé a jeho účinnost lze zvýšit prouděním případně přidáním vody (vodní mlha). Toto prostředí je vhodné pro vysocelegované oceli tzv. samokalitelné oceli.

Pro termální a izotermické bainitické kalení se používají teplé lázně, kterými jsou např. taveniny kovů (Pb , Sn a Sn) nebo solí. Slouží pro vyrovnání teplot na povrchu a v jádře nebo k provedení např. izotermického rozpadu austenitu na bainit [8, 20].

3.6 Oceli vhodné pro kalení a zušlechťování

Oceli, které jsou následně tepelně zpracovávány kalením a zušlechťováním (martenzitické kalení a následně vysokoteplotní popouštění) jsou dodávány ve stavu uklidněném a jsou tepelně nezpracovány. Oceli vhodné pro zušlechťování uvádí norma ČSN EN 10083.

Vybrané příklady ocelí pro kalení a zušlechťování i s hmotnostním procentem obsahu uhlíku a legujících prvků jsou uvedeny v tabulce 3.1 [8].

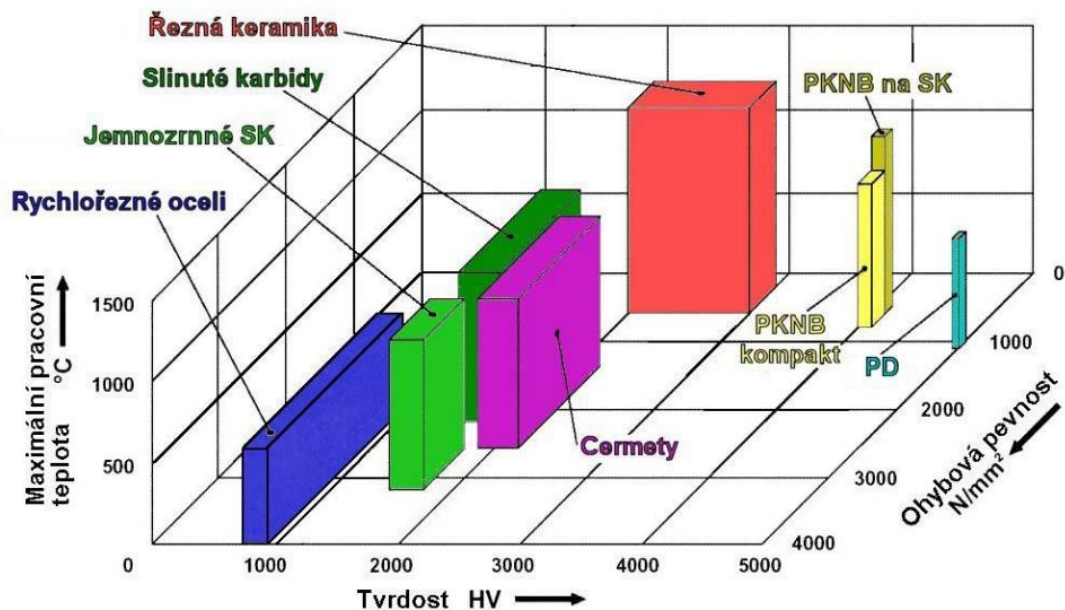
Tab. 3.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti vybraných ocelí k zušlechťování [23].

Značka	Číselné ozn.	Chemické složení v [hm. %]				
		C	Mn	Cr	Mo	Ni
C35	1.0501	0,32-0,39	0,5-0,8	max. 0,4	max. 0,1	max. 0,4
C45	1.0511	0,37-0,44	0,5-0,8	max. 0,4	max. 0,1	max. 0,4
C60	1.0601	0,57-0,65	0,6-0,9	max. 0,4	max. 0,1	max. 0,4
C22E	1.1151	0,17-0,24	0,4-0,7	max. 0,4	max. 0,1	max. 0,4
C45E	1.1191	0,42-0,50	0,5-0,8	max. 0,4	max. 0,1	max. 0,4
C60E	1.1221	0,57-0,65	0,6-0,9	max. 0,4	max. 0,1	max. 0,4
38Cr2	1.7003	0,35-0,42	0,5-0,8	0,4-0,6	-	-
41Cr4	1.7035	0,38-0,45	0,6-0,9	0,9-1,2	-	-
34CrMo4	1.7220	0,30-0,37	0,6-0,9	0,9-1,2	0,15-0,30	-
42CrMo4	1.7225	0,38-0,45	0,6-0,9	0,9-1,2	0,15-0,30	-
50CrMo4	1.7228	0,46-0,54	0,5-0,8	0,9-1,2	0,15-0,30	-
30CrNiMo8	1.6580	0,26-0,34	0,5-0,8	1,8-2,2	0,30-0,50	1,8-2,2
51CrV4	1.8159	0,47-0,55	0,7-1,1	0,9-1,2	-	-
20MnB5	1.5530	0,17-0,23	1,1-1,4	-	-	-

4 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Pro obrábění materiálů některou z třískových metod např. soustružením je velice důležité zvolit správný druh řezného nástroje, jehož břit má odpovídající houževnatost a současně vysokou tvrdost, která nesmí výrazně poklesnout ani v případě vysokých pracovních teplot. Řezné nástroje jsou vyráběny v širokém sortimentu počínaje nástrojovými oceli přes slinuté karbidy, cermy, řeznou keramiku až po supertvrdé materiály, mezi které patří polykrystalický diamant a kubický nitrid boru. Vývoj a rozšiřování sortimentu nástrojových materiálů úzce souvisí i s konstrukčními materiály, u kterých dochází k razantnímu vývoji a stále častějšímu užívání těžkoobrobitelných materiálů (superslitin, kalených ocelí, slitin hliníku atd.), a proto musí docházet i k vývoji nástrojových materiálů, aby bylo možné tyto konstrukční materiály efektivně obrábět.

Sortiment obráběných materiálů je široký a neexistuje žádný nástrojový materiál, který by byl schopen optimálně obrábět všechny konstrukční materiály [1]. Aplikace každého nástrojového materiálu se odvíjí od jeho fyzikálních (měrná hmotnost, velikost zrna, součinitel tření), chemických (inertnost, stálost), tepelných (teplota tání, tepelná vodivost, roztažnost) a mechanických (tvrdost, modulová pružnost, pevnost v tahu a ohybu, lomová houževnatost) vlastností. Na obr. 4.1 jsou porovnány vybrané nástrojové materiály podle jejich vlastností. Na volbu materiálu nástroje, jeho geometrii, rozměry a další parametry má vliv mnoho požadavků, které jsou často i protichůdné.



Obr. 4.1 Graf porovnávající vlastnosti vybraných řezných materiálů [4].

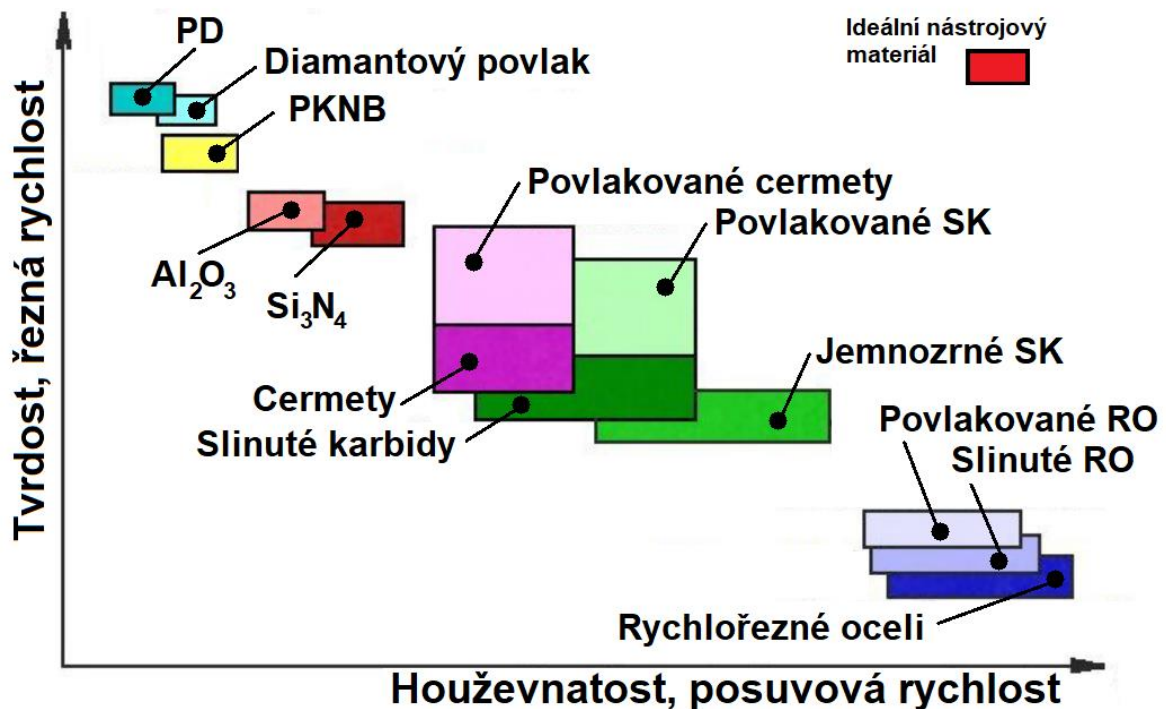
Polykrystalický diamant (česká zkratka: PD, anglická zkratka: PCD) a polykrystalický kubický nitrid boru (české zkratky: KNB nebo PKNB, anglická zkratka: CBN) mají obzvláště vysokou tvrdost a vynikající odolnost proti opotřebení, avšak také vysokou cenu, a proto je jejich použití specifické. Polykrystalický diamant je používán převážně pro obrábění neželezných kovů především hliníkových slitin (skupina ISO N – Neželezné kovy), ale kvůli afinitě k uhlíku za vyšších teplot jej není možné použít pro obrábění ocelí. Kubický nitrid boru je kvůli svým vlastnostem používán pro obrábění převážně materiálů spadajících do skupiny ISO H, tedy tvrdé materiály s tvrdostí > 45 HRC (superslitiny, kalené oceli a litiny).

Řezná keramika na bázi Al_2O_3 má vysokou tvrdost za tepla a vysokou termochemickou stabilitu, avšak nízkou houževnatost. Pro tyto vlastnosti je využívána pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi a nízkými posuvovými rychlostmi. Vyšší houževnatosti, a tedy i možnosti vyšších posuvových rychlostí dosahuje řezná keramika na bázi Si_3N_4 .

Cermety jsou nástrojovými materiály, u kterých byl karbid wolframu nahrazen karbidy a nitridy titátu. Mají vysokou chemickou stabilitu a odolnost proti difúznímu a oxidačnímu opotřebení. Jsou vhodné pro dokončovací obrábění a je možné u nich použít vyšších posuvových rychlostí, než je tomu u řezné keramiky a řeznou rychlost na úrovni povlakovaných slinutých karbidu.

Slinuté karbidy jsou houževnaté, a proto jsou použitelné v případě přerušovaných řezů a při velkých posuvových rychlostech, nikoliv však při velkých řezných rychlostech, protože mají nízkou termochemickou stabilitu. Povlakované slinuté karbidy mají zvýšenou termochemickou stabilitu díky tvrdým a stabilním karbidům a nitridům v povlaku. Takto upravené slinuté karbidy jsou vhodné pro vyšší řezné a posuvové rychlosti a velice dobře odolávají přerušovaným řezům.

Nástrojové oceli, převážně rychlořezné oceli, jsou nejhouževnatějšími nástrojovými materiály, avšak jejich tvrdost v porovnání s ostatními materiály je nízká. Jejich uplatnění je především pro tvarově složité nástroje, které by z jiných materiálů bylo obtížné vyrobit. Přehled nástrojových materiálů a jejich porovnání vzájemně mezi sebou je zobrazen na obrázku 4.2 [4, 24, 25]



Obr. 4.2 Přehled nástrojových materiálů a srovnání jejich vlastností – podle [4].

4.1 Nástrojové materiály pro kalené ocele

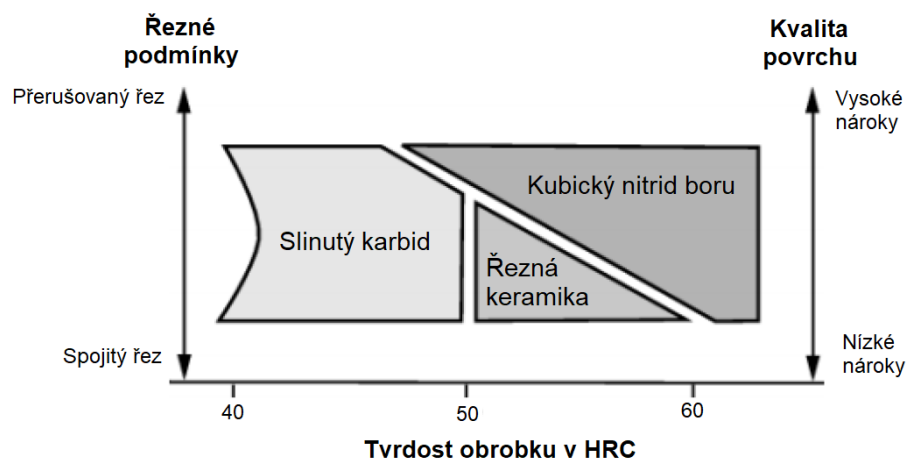
Kalené oceli spadají do skupiny obráběných materiálů ISO H, viz tab. 4.1. Při obrábění kalených a zušlechťených ocelí je důležité zvolit správný a optimální nástroj, jeho materiál, geometrii a rozměr, aby byla zaručena vysoká produktivita, požadovaná trvanlivost a spolehlivost procesu. Nástroj musí odolávat plastické deformaci při vysokých teplotách, abrazivnímu opotřebení a musí mít chemickou stabilitu a mechanickou pevnost. Všem těmto požadavkům nejlépe vyhovuje kubický nitrid boru, ale pokud nejsou kladeny vysoké nároky na jakost obrobené plochy lze použít i řeznou keramiku nebo slinutý karbid (viz obr. 4.3) [18, 24].

Tab. 4.1 Použití a klasifikace tvrdých materiálů pro řezné nástroje ČSN ISO 513 [26].

Skupiny použití			Podskupiny použití			
Identifikační písmeno	Identifikační barva	Obráběný materiál	Tvrdé řezné materiály		-	
H	šedá	Tvrdé materiály: kalená ocel, kalené litinové materiály, tvrzená litina.	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	↑ a	↓ b

^a Zvyšování rychlosti, zvyšování otěruvzdornosti materiálu pro řezné nástroje.

^b Zvyšování posuvu, zvyšování houževnatosti nástrojového materiálu.



Obr. 4.3 Faktory ovlivňující volbu nástrojového materiálu při soustružení kalených ocelí [27].

4.2 Slinuté karbidy

Průmyslová výroba slinutého karbidu započala roku 1926 v německé firmě Krupp a jednalo se o typ WC-Co (karbid wolframu s kobaltovým pojivem). Slinutý karbid je nástrojový materiál, který je vyráběn pomocí práškové metalurgie spojením různých druhů karbidů např. karbid wolframu WC, karbid tantalu TaC, karbid titanu TiC a karbidu niobu NbC pomocí pojiva kobaltu Co (má vysokou smáčivost). Slinuté karbidy jsou tedy směsí dvou a více fází, přičemž pro řezné nástroje tvoří obsah tvrdých karbidových částic více než 80 % [1]. Samotná výroba začíná přípravou homogenní, jemnozrnné práškové směsi karbidů a pojiva, následuje formování směsi do požadovaného tvaru s definovanou geometrií a utvařečem třísky pomocí formovacích lisů, hydrostatického lisování, vytlačování přes trysku nebo litím do pomocných forem. Lisovací tlak se pohybuje v rozmezí 50 až 150 MPa. Takto připravený výlisek se dále slinuje pomocí tepla (1350 – 1650 °C) v ochranné

atmosféře, kde dojde ke snížení poretity a součást se smrští až o 20 % [4]. V počátku vývoje slinutých karbidů se velikost karbidových částic pohybovala v mikrometrech, ale v současné době se jedná o desetiny (0,2 – 0,4 μm) [24, 25, 28].

Slinuté karbidy lze označit např. dle normy ČSN ISO 513 (viz tab. 4.2) nebo podle jejich užití se standardně nepovlakované slinuté karbidy dělí do 6 skupin, viz tab. 4.3.

Tab. 4.2 Značení nástrojových materiálů dle normy ČSN ISO 513 [24].

Nástrojový materiál	Symbol	
Nepovlakované slinuté karbidy s obsahem primárního WC a zrnitostí $\geq 1\mu\text{m}$	HW	
Nepovlakované slinuté karbidy s obsahem primárního WC a zrnitostí $< 1\mu\text{m}$	HF	
Nepovlakované cermety s obsahem TiC nebo TiN nebo obou	HT	
Povlakované slinuté karbidy a cermety	HC	
Řezná keramika	Oxidická ŘK s obsahem primárního Al_2O_3	CA
	Směsná ŘK na bázi Al_2O_3 s neoxidickými přísadami	CM
	Neoxidická ŘK s primárním obsahem Si_3N_4	CN
	Povlakovaná ŘK	CC
Supertvrdé materiály	Polykrystalický diamant	DP
	Polykrystalický kubický nitrid boru	BN

Tab. 4.3 Rozdělení slinutých karbidů do skupin dle jejich použití pro soustružení [1].

Skupina	Jejich aplikace
P	Slitiny na bázi železa s plynulou dlouhou třískou: nelegovaná, nízkolegovaná a vysoce legovaná ocel, litá ocel, automatová ocel.
M	Speciální slitiny kovů s dlouhou i krátkou třískou: austenitické a feriticko-austenitické oceli, korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli, oceli nemagnetické a otěruvzdorné.
K	Slitiny na bázi železa s krátkou třískou: šedá litina nelegovaná i legovaná, tvárná a temperovaná litina.
N	Neželezné kovy: slitiny Al a Cu, kompozitní materiály a plasty.
S	Speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti: superslitiny, slitiny Ti.
H	Zušlechtěné oceli: oceli s pevností nad 1 500 MPa, kalené oceli na HRC 48 až 60, tvrzené kokilové litiny.

Jednotlivé skupiny se dále ještě označují číslicemi např. P01, P15, M30, K20. S rostoucím číslem podskupiny roste i obsah pojiva ve slinutém karbidu, a tedy i houževnatost a klesá tvrdost, tyto slinuté karbidy jsou proto vhodné pro hrubovací řezy při nízkých rezných rychlostech a vyšších posuvových rychlostech [1]. Zatímco s nižším číslem podskupiny klesá množství pojiva a roste tedy tvrdost díky vyššímu obsahu karbidových částic. Aplikace těchto materiálů je vhodná pro dokončovací

operace při vysokých řezných rychlostech, nízké posuvové rychlosti, malé hloubce záběru hlavního ostří a nepřerušovaném řezu [25]. Nejměkčí fází slinutých karbidů je právě pojivo, a proto vývoj slinutých karbidů vedl i k jejich povlakování tvrdými vrstvami (viz obr. 4.4) a tak zlepšování jejich vlastností [4, 24, 28].

4.2.1 Povlakované slinuté karbidy

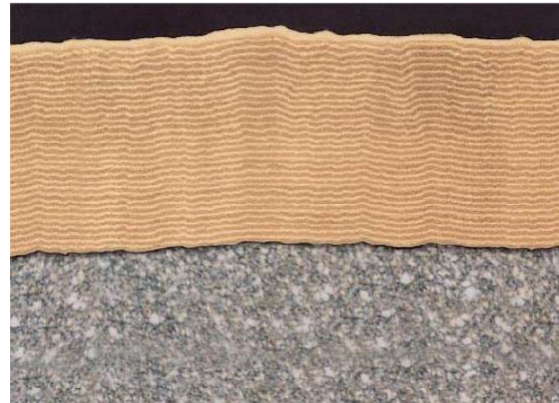
Povlakováním vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů vznikl idealizovanější řezný nástroj, nežli je nepovlakovaný slinutý karbid. Houževnaté jádro nástroje odolávající přerušovaným řezům a větší šířce záběru ostří v kombinaci s tvrdým otěruvzdorným povlakem karbidů a nitridů, výsledkem je tedy nástroj teplotně odolnější, s větší trvanlivostí a nižšími řeznými odpory [28]. Povlaky jsou obvykle na bázi titanu nebo Al_2O_3 , porovnání vlastností základních povlakových materiálů je v tabulce 4.4. Metody povlakování se dělí podle procesu nanášení, a tedy chemickou CVD (*Chemical Vapour Deposition*) nebo fyzikální PVD (*Physical Vapour Deposition*) cestou [1]. Zásadním rozdílem těchto dvou způsobů je teplota, při které dochází k nanášení povlaku. Zatímco metoda CVD probíhá při teplotách 1 000 – 1 200 °C, metoda PVD za teplot nižších než 500 °C, což umožňuje tuto metodu použít např. při povlakování rychlořezné oceli, aniž by došlo k tepelnému ovlivnění nástroje. Výhody CVD metody jsou výborná adheze mezi povlakem a podkladem, možnost nanesení povlaku o větší tloušťce (10-13 μm) a povlakování složitějších tvarů, mezi nevýhody však patří nemožnost napovlakovat ostré hrany a zbytková tahová napětí v povlaku. Metoda PVD byla původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezné oceli, v současné době je však využívána pro povlakování i slinutých karbidů. Mezi její výhody patří schopnost povlakovat i ostré hrany a vytváří tlakové zbytkové napětí v povlaku, což napomáhá při obrábění s přerušovaným řezem. Nevýhodou je však nutnost důkladné přípravy povrchu povlakované součásti a její neustálý pohyb při procesu nanášení povlaku. Mezi moderní povlakovací metody patří metoda MTCVD (*Middle Temperature Chemical Vapour Deposition*) založená na principu CVD metody avšak pracovní teploty jsou nižší (700 až 850 °C), nebo metoda PCVD (*Plasma CVD*) [29]. Při vývoji povlaků na slinutých karbidech docházelo k přelomovým změnám, které lze rozdělit do čtyř generací, počínaje 1. generací (jednovrstvý povlak karbidu titanu) až po 4. generaci, tzv. multivrstvý povlak velmi často složený z více než deseti vrstev a mezivrstev (viz obr. 4.5). Za povlaky 4. generace jsou považovány i nejmodernější diamantové, nanokompozitní, gradientní (složení povlaku se plynule mění od podkladu k povrchu povlaku), supermřížkové a povlaky z kubického nitridu boru [4, 24, 25].

Tab. 4.4 Porovnání vlastností základních povlakových materiálů [24].

Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrдость	Tvrдость za tepla
Nejlepší	Al_2O_3	Al_2O_3	TiC	Al_2O_3
↑	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN
	TiN	TiN	TiCN	TiN
	TiCN	TiCN	Al_2O_3	TiCN
Nejhorší	TiC	TiC	TiN	TiC



Obr. 4.4 Příklad nepovlakované VBD ze slinutého karbidu (vlevo) [30] a povlakované VBD Al_2O_3 (vpravo) [31].



Obr. 4.5 Příklad povlaku 4. generace (Valenite, USA) [4].

4.3 Řezná keramika

Řezná keramika v podobě oxidu hlinitého Al_2O_3 se používá v technologii broušení už řadu let v podobě brusných kotoučů. Pro použití v podobě VBD bylo nezbytné snížení zrnitosti na jednotky mikrometrů a porezity na 1 až 2 %. Řezná keramika v porovnání s běžnou keramikou neobsahuje podíl skelné (amorfni) fáze, ale jedná se o látky krystalické, které jsou vázány iontovými a kovalentními meziatomovými vazbami (obvykle oběma vazbami současně). Současná doba nabízí velký sortiment řezné keramiky a mezi její základní vlastnosti patří vysoká tvrdost, nízká houževnatost způsobená nárůstem tvrdosti, tepelná odolnost, chemická stabilita i za vysokých teplot, nízká měrná hmotnost a tepelná vodivost. Rozdělení řezné keramiky dle ČSN ISO 513 je v tabulce 4.2 další rozdělení keramických materiálů, které se využívají pro výrobu VBD je následovné:

- oxidická keramika na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3
 - čistá (Al_2O_3),
 - polosměsná ($Al_2O_3 + ZrO_2$, $Al_2O_3 + ZrO_2 + CoO$),
 - směsná ($Al_2O_3 + TiC$, $Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC$, $Al_2O_3 + TiC + TiN$),
- neoxidická keramika na bázi nitridu křemíku
 - (Si_3N_4 , $Si_3N_4 + Y_2O_3$, $Si_3N_4 + TiN$, SIALON),
- vyztužená keramika (oxidická nebo neoxidická keramika vyztužená pomocí whiskerů SiC nebo Si_3N_4) [4].

Vhodnost jednotlivých typů řezné keramiky pro určitý materiál obrobku znázorňuje tabulka 4.5 [1, 5, 24].

4.3.1 Oxidická řezná keramika

Prvním typem řezné keramiky na bázi oxidu hlinitého je tzv. **čistá keramika**, která obsahuje až 99,9 % Al_2O_3 . Pevnost v ohybu tohoto materiálu se pohybuje v rozmezí 400 až 500 MPa a má nejvyšší termochemickou stabilitu mezi nástrojovými materiály a vyznačuje se vysokou odolností proti opotřebením při obrábění vysokými řeznými rychlostmi. Její barva závisí od způsobu lisování, při lisování za studena je barva bílá, u keramiky lisované za tepla je barva šedá [28]. Aplikace je převážně pro dokončovací soustružení šedé litiny, uhlíkových

a nízkolegovaných ocelí. Přidáním přísady (nejčastěji oxid zirkoničitý ZrO_2) do čisté keramiky vzniká tzv. **polosměsná keramika**. Množství přísady může být až 20 % a i v kombinaci $Al_2O_3 + ZrO_2 + CoO$. Přidáním oxidu zirkoničitého narůstá houževnatost materiálu, avšak tepelná vodivost zůstává stále nízká a v případě nepříznivých podmínek obrábění může dojít k vylamování břitu. Další podskupinou oxidické keramiky je **směsná keramika**, která je kombinací Al_2O_3 a karbidu titanu TiC (20 až 40 %) případně dalších přísad. Přidáním kovové fáze získává keramika vyšší odolnost proti mechanickým rázům a současně vyšší tepelnou vodivost, která příznivě ovlivní odolnost proti tepelnému šoku. Díky svým vlastnostem a vyšší houževnatosti je tento řezný materiál vhodný pro soustružení kalených a zušlechťených ocelí, tvrdé litiny a dokončovací frézování. Stejně jako polosměsná keramika má i směsná keramika černou barvu [4, 5, 24].

4.3.2 Neoxidická keramika

Jedná se o řeznou keramiku na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 případně dalších přísad. Tento nástrojový materiál se vyznačuje vyšší odolností proti teplotním šokům než oxidická keramika [1], má vysokou odolnost proti mechanickému opotřebení a vyšší houževnatost a zachovává si vyšší stupeň tvrdosti za tepla než slinuté karbidy. Neoxidická keramika je vhodná především pro dokončovací a hrubovací soustružení šedé litiny. Při obrábění šedé litiny je schopná odebírat velký objem materiálu při vysokých řezných rychlostech až $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, kdy odebíraný materiál klade vysoké požadavky na nástroj [4]. Speciální skupinu neoxidické keramiky tvoří tzv. Sialony, které jsou na bázi nitridu křemíku s hliníkem (*Si-Al-O-M*). Sialony se vyznačují vysokou tvrdostí cca 2 000 HV, lepší ohybovou pevností a odolností proti teplotním šokům [1]. Tato skupina řezné keramiky je vhodná i pro soustružení těžkoobrobitelných žárupevných a žáruvzdorných slitin na bázi niklu [5, 24, 28].

4.3.3 Vyztužená keramika

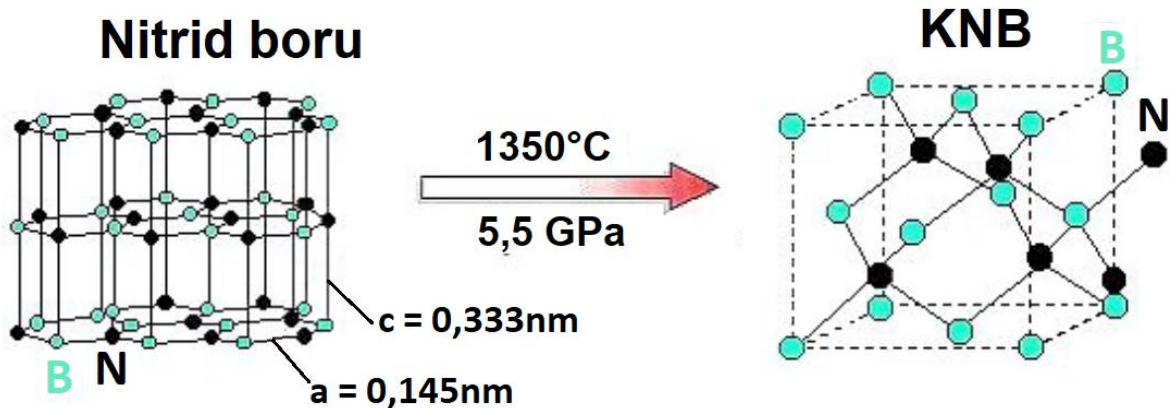
Představuje další odvětví řezné keramiky a jedná se o keramiku vyztuženou whiskery, jejichž obsah je v rozsahu 20 až 30 % [4]. Whiskery jsou vlákna vysoké pevnosti ze SiC nebo Si_3N_4 , které v průměru mají $0,5 - 1 \mu\text{m}$ a na délku $10 - 20 \mu\text{m}$ a jsou přidávány do základní matrice Al_2O_3 , $Al_2O_3 + TiC$, Si_3N_4 nebo Sialonu [24]. Whiskery jsou přidávány do řezné keramiky především pro zvýšení lomové houževnatosti, ohybové pevnosti, tvrdosti za tepla a odolnosti proti opotřebení. Svoji přítomností rozptylují energii lomového procesu a tím snižují riziko křehkého porušení vyměnitelné břitové destičky [28]. Whiskery jsou díky lisování zatepla rovnoměrně rozptýleny ve vyměnitelné břitové destičce a její výsledná barva je zelená. Vyztužená keramika je především vhodná pro soustružení žáruvzdorných a žárupevných slitin, kalených ocelí a šedé litiny [5, 25].

Tab. 4.5 Vhodnost typu řezné keramiky k materiálu obrobku [5].

	Čistá a polosměsná keramika	Směsná keramika	Neoxidická keramika	Vyztužená keramika
Šedá litina	✓	✓	✓	
HRSA slitiny		✓	✓	✓
Kalená ocel		✓		✓

4.4 Kubický nitrid boru

Jedná se o syntetický nástrojový materiál, který se v přírodě nevyskytuje. Kubický nitrid boru (české zkratky: KNB nebo PKNB, anglická zkratka: CBN) spadá společně s polykrystalickým diamantem do skupiny supertvrdých nástrojových materiálů. Oba materiály lze díky svým vlastnostem použít pro speciální aplikace. Elementární prvky, ze kterých se skládá kubický nitrid boru, jsou bor *B* a dusík *N*. Krystalová mřížka nitridu boru je podobně jako u grafitu hexagonální a díky působení tlaku a vysoké teploty se transformuje hexagonální mřížka nitridu boru na kubickou (viz obr. 4.6). KNB má směrovou kovalentní vazbu a podobně jako diamant má mimořádnou tvrdost v rozsahu 4 000 až 5 500 HV.



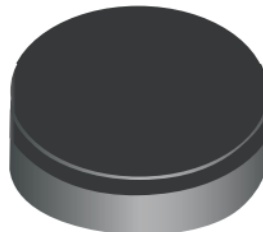
Obr. 4.6 Krystalová mřížka KNB - podle [4].

Kubický nitrid boru si zachovává vysokou tvrdost i při extrémních teplotách (až 2 000 °C) a je odolný proti abrazivnímu opotřebení [28]. Vyznačuje se i dobrou chemickou stálostí na rozdíl od polykrystalického diamantu, který není možné použít na obrábění kovových materiálů kvůli afinitě uhlíku [4]. Nástrojový materiál kubický nitrid boru se nejčastěji používá pro obrábění ocelových výkovků, kalených i povrchově kalených ocelí, litin, žárupevných a žáruvzdorných HRSA slitin [1, 5, 24].

Nástroje z kubického nitridu boru se vyrábí při vysoké teplotě a tlaku, kde dochází ke spojení kubického nitridu boru s pojivem v podobě keramických nebo kovových materiálů, které mají vliv na výsledné vlastnosti nástroje, stejně tak zrnitost krystalů KNB [4]. Kombinací **nízkého obsahu KNB** (v rozmezí 40 až 60 %) a keramického pojiva je získána lepší odolnost proti opotřebení a vyšší chemická a tepelná odolnost. Takovýto druh nástrojového materiálů je obzvláště vhodný pro obrábění tvrdých kalených ocelových obrobků. Při použití **vysokého obsahu KNB** (v rozmezí 85 až 100 %) a případně kovového spojovacího materiálu je docílena vyšší houževnatost, která je především vhodná pro obrábění žárupevných a žáruvzdorných HRSA slitin [1, 5, 24].



Obr. 4.7 VBD s připájeným segmentem KNB od firmy Sandvik Coromant [32].



Obr. 4.8 VBD s nalisovaným kompaktním segmentem od firmy Sandvik Coromant [33].



Obr. 4.9 Monolitní VBD od firmy Sandvik Coromant [32].

VBD s kubickým nitridem boru mají různé provedení, ať v podobě tenkého povlaku KNB (přibližně 5 μm) na VBD ze slinutého karbidu, nebo segmentu KNB připájeného na VBD (viz obr. 4.7), případně nalisovaná kompaktní VBD na substrátu ze slinutého karbidu (viz obr. 4.8) a poslední variantou je monolitní VBD z kubického nitridu boru (viz obr. 4.9) [1]. Při soustružení těmito vyměnitelnými břitovými destičkami lze použít vysokých řezných rychlostí až 220 m/min a výsledný obrobený povrch může dosahovat takové kvality, že není zapotřebí povrch následně brousit. Omezení vhodnosti použití kubického nitridu boru jako nástrojového materiálu je však tvrdost obrobku, která pod hranici 45 HRC má negativní vliv na odolnost proti otěru a způsobuje vyšší množství feritu ve struktuře [5, 24, 30-33].

4.5 Sortiment nástrojových materiálů pro soustružení

Sortiment nabízených nástrojových materiálů a jejich tříd vhodných pro soustružení kalených ocelí je velice obsáhlý. Proto kap. 4.5.1 až 4.5.4 představují výběr nástrojových materiálů od vybraných výrobců, kterými jsou:

- Sandvik Coromant,
- Dormer Pramet,
- Seco Tools,
- Iscar.

4.5.1 Sandvik Coromant

CB7015 – Třída obsahující 50 % jemnozrnného KNB s keramickým pojivem. Maximální výkonnosti je dosaženo při spojitým až lehce přerušovaném řezu a umožňuje vysoké řezné rychlosti až 220 m/min.

CB7125 – Zde je střední obsah KNB a vyměnitelné břitové destičky jsou povlakovány metodou PVD pro lepší odolnost proti tvorbě trhlin. Třída je vhodná především pro soustružení indukčně kalených ocelí s lehkými až středně těžkými přerušovanými řezy.

CB7525 – Jedná se o velice houževnatou třídu materiálu, která je tvořena 90 % jemnozrnného KNB v keramickém pojivu. Její hlavní aplikace je pro obrábění šedé litiny, ale je jí možné použít i pro soustružení indukčně kalených a cementovaných ocelí s těžkými přerušovanými řezy.

CB7135 – Třída s vysokým obsahem KNB, čímž je zaručena odolnost proti křehkému lomu a je tedy vhodná pro těžké přerušované řezy při nízkých až středních řezných rychlostech.

CB7025 – Třída tvořena 60 % KNB se zrna velikosti 1 až 3 μm a keramickým pojivem. Tato třída je vysoce odolná proti vzniku lomu a je univerzální třídou pro soustružení kalených součástí za podmínek: středně těžké až lehké přerušované řezy při středních řezných rychlostech přibližně 150 m/min.

CB7925 – Tato třída je tvořena 75 % kubického nitridu boru se zrna o velikosti 4 a 12 μm a je dostupná pouze v monolitickém provedení (viz obr. 4.9). Svými vlastnostmi je vhodná pro soustružení litin a kalených ocelí s úběrem velkého objemu materiálu za nízkých řezných rychlostí.

CC6050 – Jedná o třídu směsné keramiky obsahující karbidy a nitridy titanu, čímž je zvýšena houževnatost a tepelná vodivost. Vhodná především pro lehké a spojitě řezy v kalených ocelích.

CC670 – Vyztužená keramika whiskery, která má vysokou houževnatost a je vhodná pro soustružení superslitin na bázi niklu, ale je vhodná i pro soustružení kalených ocelí při těžkých a přerušovaných řezech [32, 33, 34, 35].

4.5.2 Dormer Pramet

T8315 – Jedná se vysoce otěruvzdornou třídu materiálu slinutých karbidů s nízkým obsahem kobaltu opatřenou nano-vrstevnatým PVD povlakem s gradientním přechodem. Třída materiálu je vhodná pro soustružení při vyšších řezných rychlostech a stabilních podmínkách.

T8010 – Třída materiálu na VBD pro soustružení závitů do kalených ocelí, litin a žárupevných superslitin za vyšší řezné rychlosti. Materiál je opatřen PVD povlakem s optimalizovaným vnitřním pnutím a vysokou odolností proti opotřebení.

TB310 – Je třídou kubického nitridu boru s vysokou odolností proti otěru a teplotní a chemickou stabilitou. Vhodnou převážně pro obrábění kalených ocelí při spojitých a lehce přerušovaných řezech.

TC100 – Směsná keramika na bázi Al_2O_3 a karbidu titanu TiC , která má vynikající tepelnou odolnost a je vhodná pro vysoké řezné rychlosti. Keramika je vhodná pro obrábění šedé a tvárné litiny, žárupevných slitin na bázi kobaltu a niklu, titanových slitin. Je vhodnou alternativou ke třídě TB310 při obrábění kalených a temperovaných litin při tvrdosti obrobku do 65 HRC [36, 37, 38].

4.5.3 Seco Tools

TH1000 – Třída slinutého karbidu s velmi tvrdou mikrostrukturou a PVD povlakem $Ti-Al-Si-N$. Břit umožňuje úběr velkého objemu materiálu i při přerušovaných řezech a je převážně vhodný pro obrábění vysoce legovaných a kalených ocelí.

TH1500 – Slinutý karbid s povlakem CVD $TiCN + Al_2O_3$. Materiál je vhodný pro soustružení převážně kalených ocelí.

CBN010 – Třída tvořená 50 % kubického nitridu boru (velikost zrna 2 μm) a keramickým pojivem. VBD jsou nepovlakované a jejich provedení může být monolitní, s připájenými segmenty, případně s nalisovaným kompaktním segmentem (jednostranně i oboustranně). Jedná se o univerzální třídu pro dokončovací operace na kalených a nástrojových ocelích.

CH0550 – Povlakované VBD se složením 40 % kubického nitridu boru s velikostí zrn 3 μm a keramickým pojivem. Provedení VBD může být monolitní nebo s připájenými segmenty. Třída materiálu je využívána pro soustružení kalených ocelí za účelem dosažení vysoké jakosti povrchu.

CBN060K – Třída povlakovaných VBD s obsahem 60 % KNB s velikostí zrna 1 až 2 μm a keramickým pojivem. Provedení destiček je stejné jako v případě třídy CBN010. Materiál je vhodný pro dokončovací soustružení kalených ocelí.

CBN150 – Jedná se o třídu obsahující 45 % jemnozrnného kubického nitridu boru (velikost zrna < 1 μm) a keramické pojivo. VBD jsou nepovlakované a v podobě připájených segmentů nebo nalisovaného kompaktního segmentu. Třída je vhodná převážně pro silně přerušované řezy při obrábění kalených ocelí a litin [39, 40].

4.5.4 Iscar

IC807 – Třída povlakovaných slinutých karbidů s povlakem PVD $TiAlN$. Nástrojový materiál je houževnatý a vhodný k obrábění austenitických korozivzdorných ocelí, žárupevných a žáruvzdorných superslitin i kalených ocelí.

IC5005 – Třída slinutých karbidů s CVD povlakem TiC a Al_2O_3 . Doporučují se pro obrábění převážně šedé a tvárné litiny, ale i pro kalenou ocel.

IB10H – Třída obsahující 53,3 % extra jemného KNB. VBD nejsou povlakovány a využívají se pro lehké a spojitě řezy při dokončovacím soustružení kalených ocelí středními až vysokými reznými rychlostmi.

IB25HA – Třída materiálu složená ze 75 % středně zrnitého KNB a keramického pojiva. Materiál je povlakovaný PVD metodu *TiC* a je převážně využíván pro lehké až středně těžké přerušované řezy při obrábění kalených ocelí.

IB55 – Třída nepovlakovaného KNB jehož obsah je 65 %. Využití této třídy nástrojového materiálu je pro spojitě a mírně přerušované řezy při středních rezných rychlostech u dokončovacího soustružení kalených ocelí [41, 42].

5 SOUSTRUŽENÍ KALENÝCH OCELÍ

Soustružení kalených ocelí se řadí mezi tzv. tvrdé obrábění, do kterého spadá obrábění materiálů s tvrdostí vyšší než 55 HRC (někdy se uvádí 45 HRC). Dříve tyto materiály nebylo možné soustružit a jedinou možností obrábění těchto materiálů bylo broušení. Nicméně s vývojem nástrojových materiálů je dnes možné tyto tvrdé materiály obrábět i třískovými metodami s definovanou geometrií obráběcího nástroje (soustružení, frézování, vrtání atd.). Možnost soustružit tvrdé a kalené součásti přináší řadu výhod, jako například vysokou kvalitu obrobené plochy, zkrácení výrobních časů, provozní flexibilitu, nižší náklady na strojní investice, nižší energetickou náročnost, není nutné použití rezné kapaliny, jednodušší manipulace s třískami [5, 33, 43].

5.1 Obrobitelnost kalených ocelí a geometrie nástrojů

Při obrábění kalených ocelí je nástroj i stroj vystaven nepříznivým vlivům: vysoké teplotě v oblasti řezání, vysoké a proměnné velikosti řezných sil, vysokému tlaku na malý průřez třísky v blízkosti ostří, pnutí v obrobku v průběhu obrábění. Proto při volbě nástrojového materiálu je nezbytné na tyto vlivy brát ohled a nástroje musejí splňovat značné požadavky, mezi které hlavně patří odolnost proti působení abrazivního opotřebení, chemická stabilita a tvrdost zatepla (více o nástrojových mat. v kap. 4). Při obrábění kalené oceli za pomoci slinutého karbidu a použití kryogenního chlazení tekutým dusíkem oproti běžné procesní kapalině, bylo zjištěno snížení řezné síly o 18 % a prodloužení životnosti nástroje až o 34 minut [45]. Při použití nástrojového materiálu KNB dosahuje obrobený povrch vysoké kvality a je možné tak broušení nahradit soustružením. Pro zvýšení obrobitelnosti kalených ocelí je zásadní i vhodná volba geometrie břitové destičky, která má vliv i na životnost nástroje a produktivitu. Menší poloměr špičky r_e (0,2 až 0,4 mm) má příznivý vliv na stabilitu řezného procesu, vznikají menší řezné síly a je zaručeno dobré dělení třísek. Při použití většího poloměru špičky ($r_e = 0,8$ až 12 mm) je možné dosáhnout vyšší kvality obrobeného povrchu, snížení tloušťky třísky s čím souvisí snížení velikosti opotřebení ve tvaru výmolu na čele [33]. Nástroje z KNB a rezné keramiky mohou mít různé provedení ostří, společnost Sandvik Coromant uvádí tři různá provedení [33] a to typu S, T a E (provedení typu S a T viz obr. 5.1). Provedení ostří s fazetkou typu T snižuje řezné síly a umožňuje dosažení nejvyšší kvality povrchu při spojitých řezech. Typ S má fazetku a navíc honované plochy ostří, které je odolnější proti vylamování a zaručuje konzistentní kvalitu obrobené plochy. Fazetka rozkládá řezné síly na větší plochu a zvyšuje tím odolnost břítu. Zvyšující se šířka fazetky přispívá ke stabilitě řezného procesu, avšak snižuje přesnost a jakost povrchu [33]. Ostří typu E, nemá fazetku a je honované pro zpevnění ostří a zvyšuje odolnost proti vylamování. Je vhodná především pro dokončovací operace, kde prioritou je jakost obrobené plochy [5, 43, 44].



Obr. 5.1 Provedení ostří typu S (vlevo) a typu T (vpravo) u VBD z KNB a rezné keramiky od společnosti Sandvik Coromant – podle [44].

5.2 Mechanizmy a formy opotřebení nástroje

Důležitým faktorem při soustružení kalených ocelí pro dosažení požadovaných technických a ekonomických ukazatelů je volba nástroje, ale i obráběcího stroje. Stroje musí být dostatečně tuhé a přesné, protože nástrojový materiál pro soustružení kalených ocelí je nejčastěji směsná keramika nebo KNB, které mají relativně malou lomovou houževnatost, a mohlo by docházet k vylamování ostří. Opotřebení nástroje je běžný proces, který je způsoben vzájemným silovým kontaktem a relativním pohybem obrobku vůči nástroji a třískou odcházející po čele nástroje. Mezi vlivy ovlivňující proces opotřebení nástroje patří fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného a nástrojového materiálu, druh řezu (plynulý nebo přerušovaný řez), geometrie nástroje a řezné podmínky [1, 4, 43].

5.2.1 Mechanizmy opotřebení

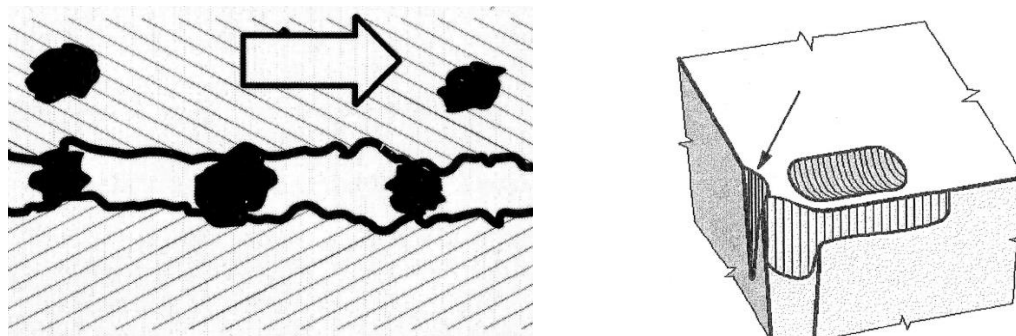
Mechanizmy opotřebení řezného nástroje lze zařadit do dvou skupin na základě jevu, který toto opotřebení způsobuje, tedy na fyzikálně-mechanické a chemické mechanizmy (viz tab. 5.1).

Tab. 5.1 Rozdělení základních mechanismů opotřebení břitu nástroje [1].

Fyzikálně-mechanické mechanizmy	Chemické mechanizmy
Křehký lom	Difúzní otěr
Plastická deformace	Tvorba chemických sloučenin
Abrazivní otěr	Interkrystalické zeslabování
Adhezní otěr	Termo-elektrické opotřebení
Teplotní trhliny	Kombinace mechanismů
Delaminace vrstev	
Kmity soustavy S-N-O	
Únava materiálu	
Kombinace mechanismů	

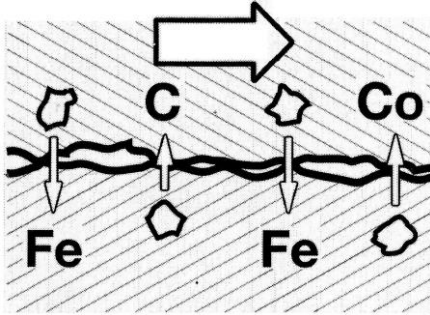
Mezi základní mechanizmy opotřebení, které je možné na břitu nástroje nejčastěji pozorovat patří následující:

- **Abrazivní opotřebení:** Je velmi častou formou opotřebení, která vzniká hlavně působením tvrdých částic v materiálu obrobku případně částic uvolněných z nástrojového materiálu. Schopnost břitu odolávat abrazivnímu opotřebení především závisí na jeho tvrdosti a hustotě tvrdých částic ve struktuře nástrojového materiálu. Na obrázku 5.2 je znázorněno schéma abrazivního opotřebení.

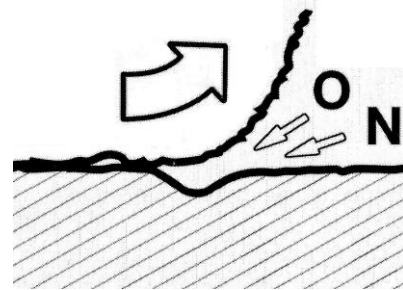


Obr. 5.2 Schéma procesu abrazivního opotřebení (vlevo) a abrazivního opotřebení na hřbetu včetně výmolu na čele a oxidační hřbetní rýhy (vpravo) [1, 4]

- **Difúzní opotřebení:** Vzniká působením chemických vlivů, přesněji afinitou nástrojového materiálu k materiálu obrobku a sníženou chemickou stabilitou. Atomy migrují z obráběného do nástrojového materiálu a naopak (viz obr. 5.3), tím dochází k vytváření nežádoucích sloučeniny ve struktuře nástroje. Tento druh opotřebení je teplotně aktivovaný a důsledkem je vznik výmolu na čele (viz obr. 5.2).

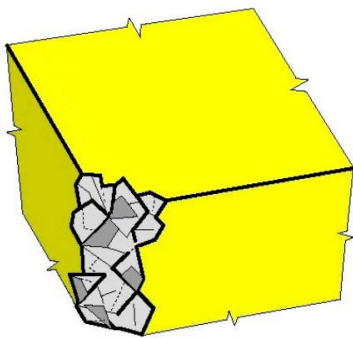


Obr. 5.3 Schématické znázornění procesu difúzního opotřebení [2].

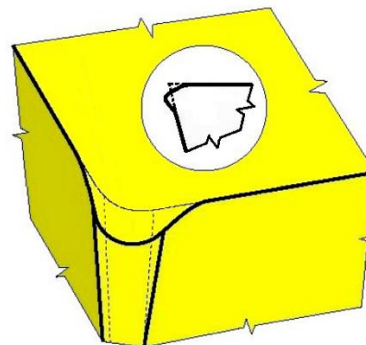


Obr. 5.4 Schématické znázornění procesu oxidačního opotřebení [2].

- **Oxidační opotřebení:** Způsobují vysoké teploty při procesu obrábění a přítomnost okolního vzduchu, což má za následek vznik chemických sloučenin (převážně oxidů) na povrchu nástroje (viz obr. 5.4). Pevné a tvrdé sloučeniny např. oxid hlinitý mohou způsobovat sekundární (oxidační) hřbetní rýhu (viz obr. 5.2).
- **Křehký lom:** Je způsoben vysokým mechanickým zatížením, případně nehomogenitou obráběného materiálu a krátkodobým přetížením břitu (např. náraz břitu na tvrdou fázi, vměstek) a při přerušovaných řezech (schéma lomu viz obr. 5.5).
- **Adhezní opotřebení:** Na nástroji vznikají nárůstky a tzv. mikrosvarý kvůli vysokým teplotám a tlakům, chemické příbuznosti materiálu obrobku a nástroje. Při porušení mikro-svarů vzniklých na vrcholcích nerovností čela a třísky, případně při oddělení nárůstků dochází k porušování, vydrolování a vylamování částic na povrchu nástroje, což způsobuje opotřebení ve formě výmolu na čele (viz obr. 5.2).
- **Plastická deformace:** Je opotřebení způsobené vysokým teplotním a mechanickým namáháním břitu nástroje, které se projeví deformací ostří tzv. lavinové opotřebení (viz obr. 5.6). Je způsobené odpevněním substrátu nebo deformací pojiva [2, 4, 5].



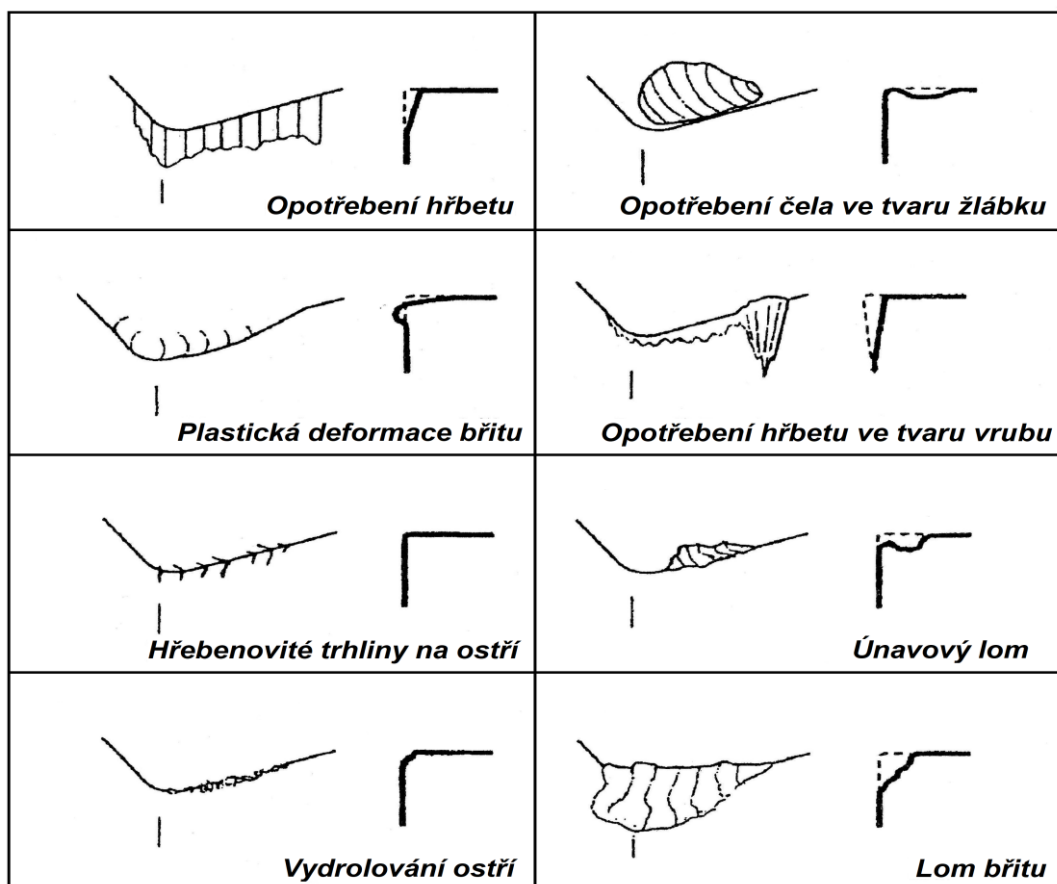
Obr. 5.5 Schéma křehkého lomu [4].



Obr. 5.6 Schéma plastické deformace špičky [4].

5.2.2 Formy opotřebení

Mechanismy opotřebení případně jejich kombinace se projevuje na břitu řezného nástroje v různých formách, které lze klasifikovat podle obr. 5.7, kde jsou schematicky znázorněny základní formy opotřebení.

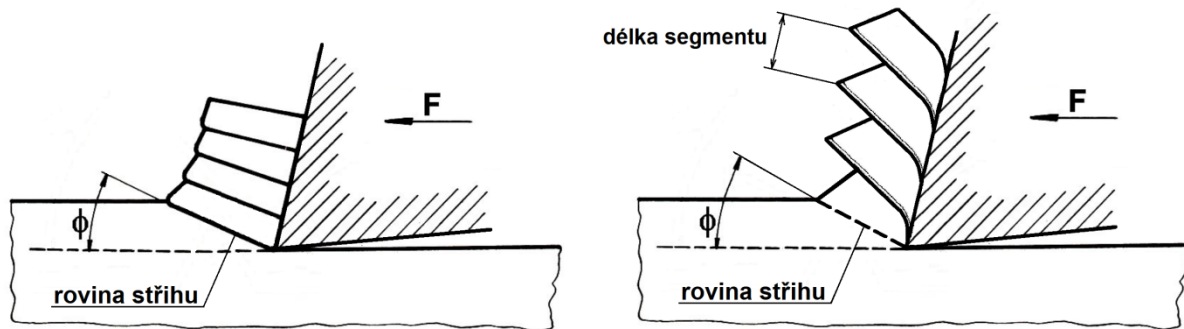


Obr. 5.7 Základní formy opotřebení břitu nástroje - podle [2].

Při obrábění kalených ocelí je řezný proces charakterizován vysokým mechanickým a tepelným zatížením a břit nástroje je zatěžován víc než při obrábění oceli před tepelným zpracováním. Nástroj musí mít dostatečnou tvrdost i za vysokých teplot, aby nedocházelo k plastické deformaci břitu, která je častým opotřebením právě při obrábění slinutými karbidy. Tvrdost slinutých karbidů lze zvýšit snížením obsahu pojiva a zmenšením rozměru zrn karbidů, čímž je však snížena houževnatost nástroje a je kladen větší důraz na tuhost stroje, aby nedocházelo k vydrolování ostří a lomu břitu. Hlavními formami opotřebení u slinutých karbidů je výmol na čele, plastická deformace a opotřebení hřbetu. Při použití nástrojového materiálu směsné keramiky na obrábění kalené oceli dochází k opotřebením hřbetu, výmolu na čele a často se vyskytují hřebenové trhliny na ostří [46]. KNB má z používaných nástrojových materiálů pro obrábění kalených ocelí největší tvrdost a částice uvolněné z břitu vytvářejí rýhy na čele i hřbetu nástroje [47]. Na čelo nástroje působí abrazivní (uvolněné částice z nástroje, ale i tvrdé složky obráběného nástroje) i adhezní mechanismus opotřebení a vytváří výmol na čele, avšak v těsné blízkosti ostří [43, 48, 49].

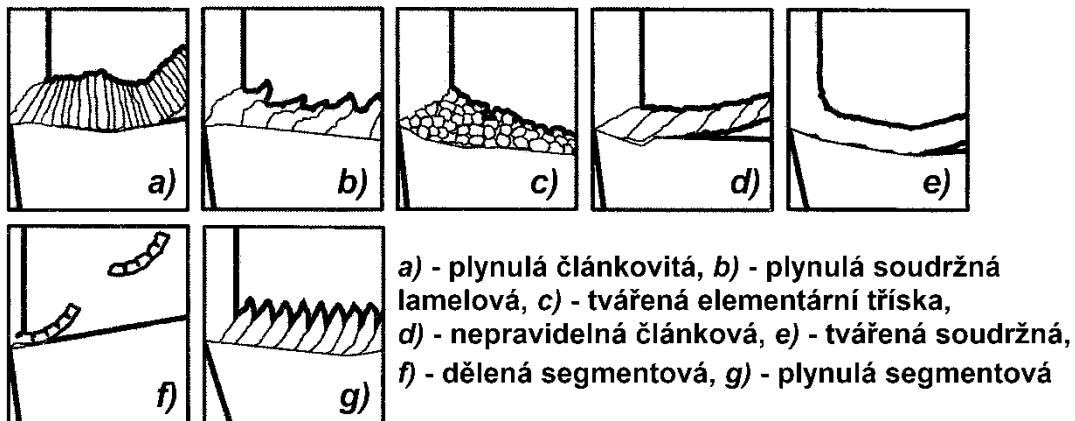
5.3 Mechanismus tvorby třísky

Řezný proces je realizován za pomoci soustavy stroj, nástroj, obrobek a je to proces především intenzivní plastické deformace podél roviny stříhu, která je skloněna pod úhlem střížné roviny ϕ (viz obr. 5.8) a intenzivního tření v kontaktu nástroj-tříška a nástroj-obrobek [43]. Plastickou deformaci ovlivňuje velké množství faktorů, mezi které patří např. chemické složení obráběného materiálu a jeho mechanické a fyzikální vlastnosti, způsob výroby a vnitřní struktura. Mimo jiné se tyto vlastnosti v průběhu řezného procesu mohou měnit (v důsledku vysoké teploty, rychlosti deformace apod.).



Obr. 5.8 - Vznik plynulé článkové třísky pro tvárné materiály (vlevo) a segmentové třísky při obrábění kalené oceli (vpravo) - podle [4, 43].

Obvykle při soustružení ocelí do tvrdosti přibližně 50 HRC vzniká plynulá článkovitě soudržná tříška (viz obr. 5.9 a), avšak tato hranice tvrdosti je ovlivněna druhem oceli, řeznými podmínkami a geometrií. Při soustružení tvrdých materiálů jako např. kalených ocelí nejčastěji vzniká specifická dělená segmentová tříška (viz obr. 5.9 f), dána vlastnostmi obráběného materiálu a výraznou nehomogenitou teplotního pole v zóně řezání. Proces vytváření segmentové třísky je výrazně odlišný od procesu vytváření plynulé třísky. Hlavní rozdílem je, že při plynulém vytváření třísky je dominantní efekt mechanického zpevňování materiálu v rovině skluzu (viz obr. 5.8). V oblasti primární plastické deformace pod úhlem ϕ dochází k intenzivnímu zpevňování materiálu v této rovině (oblasti). To způsobí přesun plastické deformace do další oblasti, která přichází do zóny řezu (doposud nedeformované oblasti) v důsledku vzájemného pohybu obrobku vůči nástroji. Tento proces vede k relativně rovnoměrnému rozložení plastické deformace v odcházející tříšce a tvorbě tedy plynulé článkové třísky. Zatímco při tvorbě segmentové třísky je dominantnějším efektem snižování pevnosti a tvrdosti obráběného materiálu v důsledku velmi



Obr. 5.9 Základní druhy třísek při obrábění – podle [2].

vysokých teplot v rovině stříhu. Intenzivní plastické přetvoření je lokalizováno do úzké oblasti, která vytváří okraj neboli hranici jednotlivého segmentu třísky. Oblasti hranic segmentů jsou charakteristické vysokou intenzitou plastického přetvoření, přičemž samotný segment je plasticky přetvořený o mnoho méně, a tedy vytvořená segmentová tříška má nehomogenní rozložení plastické deformace. Úhel střížné roviny ϕ při obrábění tvrdých materiálů, jako právě kalené oceli, nabývá vyšších hodnot nežli při obrábění tepelně nezpracované oceli. Rychlost odcházející segmentové třísky je z důvodu nižšího pěchování vyšší, než je tomu u plynulé třísky [1, 2, 4, 43].

5.4 Drsnost povrchu obrobené plochy

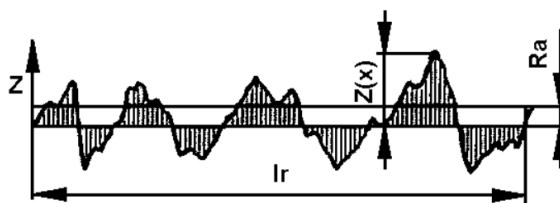
Geometrie obrobené součásti se liší od ideální geometrie zadané výkresovou dokumentací, což je způsobené mikronerovnostmi na povrchu v důsledku silových účinků nástroje na obrobenou plochu a teplotním působením, které vzniká při procesu obrábění. Strukturu povrchu lze podle příslušných nerovností rozčlenit na jednotlivé složky. Norma ČSN EN ISO 4287 definuje následující geometrické parametry pro hodnocení struktury povrchu:

- R – pro drsnost povrchu,
- W – pro vlnitost povrchu,
- P – pro základní profil.

Drsnost je souhrn nerovností povrchu s poměrně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Drsnost povrchu ovlivňuje spolehlivost a funkční vlastnosti obrobené součásti. Povrchový stav součásti se promítá do různých aspektů (hlučnost, mez únavy, korozní odolnost, třecí vlastností atd.). Na kvalitu výsledného soustruženého povrchu má vliv mnoho faktorů: druh obráběného materiálu, řezné podmínky, materiál a geometrie řezného nástroje a jeho stupeň opotřebení, ale také tuhost celé soustavy stroj-nástroj-obrobek. Drsnost povrchu lze charakterizovat různými druhy parametrů R_a , R_z , R_p , R_v , R_y , R_c , R_t , R_q apod., ale mezi nejčastěji uváděné a nejdůležitější patří právě parametry R_a a R_z [5, 43, 49].

5.4.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a

Parametr R_a je velmi často používanou hodnotou k vyhodnocování struktury povrchu. Tento parametr je definován středním aritmetickým průměrem absolutních odchylek profilu v rozsahu měřené délky l_r (viz obr. 5.10). Vypovídající schopnost parametru R_a je však nízká u extrémně drsných nebo naopak jemně obrobených ploch a v případě, že měřená délka l_r je krátká.



Obr. 5.10 Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a [49].

Výpočet parametru u skutečného profilu se provede pomocí integrace, viz vztah (5.1).

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad [\mu m] \quad (5.1)$$

Teoretickou hodnotu průměrné aritmetické úchylky profilu Ra_t soustružené plochy při dokončovacím obrábění je možné vypočítat podle vztahu (5.2). Zde je předpoklad, že struktura povrchu je realizována jako reprodukce obloukové části špičky nástroje [5, 43, 49, 51].

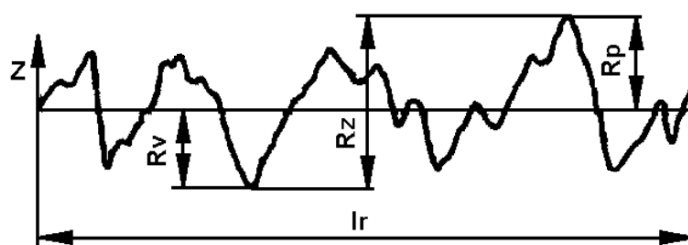
$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot f^2}{18 \cdot \sqrt{3} \cdot r_\varepsilon} \quad [\mu m] \quad (5.2)$$

kde:

r_ε	[mm]	- poloměr špičky
f	[mm]	- posuv na otáčku

5.4.2 Největší výška profilu Rz

Jedná se o parametr drsnosti, který představuje součet největšího výstupku R_p a nejnižší prohlubně R_v v rozsah měřené délky l_r . Parametr je schematicky znázorněn na obr. 5.11.



Obr. 5.11 Největší výška profilu Rz – podle [49].

Teoretickou výšku profilu Rz_t lze vypočítat dvěma způsoby v závislosti na poloměru špičky soustružnického nástroje $r_\varepsilon = 0$ nebo $r_\varepsilon > 0$. Pro poloměr špičky nástroje $r_\varepsilon = 0$ platí vztah (5.3).

$$Rz_t = f \cdot \frac{\sin \kappa_r \cdot \sin \kappa'_r}{\sin(\kappa_r + \kappa'_r)} \quad [\mu m] \quad (5.3)$$

A pro poloměr špičky $r_\varepsilon > 0$ při soustružení platí vztah (5.4) na výpočet teoretické výšky profilu [5, 43, 49, 50].

$$Rz_t = fce(r_\varepsilon, f) = \left(r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - 0,25 \cdot f^2} \right) \cdot 10^3 \quad [\mu m] \quad (5.4)$$

kde:

κ_r	[°]	- úhel nastavení hlavního ostří
κ'_r	[°]	- úhel nastavení vedlejšího ostří
r_ε	[mm]	- poloměr špičky
f	[mm]	- posuv na otáčku

6 REALIZACE EXPERIMENTU

Cílem experimentální části práce je zjištění vlivů řezných podmínek (přesněji řezné rychlosti v_c a šířky záběru hlavního ostří a_p) na drsnost povrchu obrobené plochy z kalené oceli. Experiment byl prováděn ve spolupráci se společností KSK Precise Motion, a.s. sídlící v Kuřimi, která se zaměřuje na výrobu vodících tyčí, kuličkových a trapézových šroubů.

6.1 Obráběcí stroj

Experimentální zkoušky byly prováděny na CNC horizontálním soustruhu PUMA 700LY od firmy DOOSAN (viz obr. 6.1) a jehož technické parametry jsou uvedeny v tabulce 6.1.



Obr. 6.1 Horizontální soustruh PUMA 700LY.


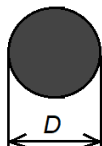
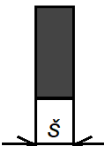

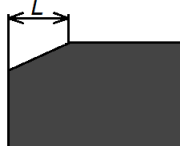
Tab. 6.1 Technické parametry stroje PUMA 700LY.

Řídicí systém	DOOSAN FANUC 32i-A
Počet řízených os	4
Vřeteno	
Maximální otáčky	1500 min ⁻¹
Maximální krouticí moment	6 605 Nm
Maximální výkon (trvale / 30 min)	37 / 45 kW
Pracovní rozsah a nástrojová hlava	
Max. oběžný průměr nad ložem	1 140 mm
Max. oběžný průměr nad supportem	1 000 mm
Max. délka soustružení ve sklícidle	3 250 mm
Max. průměr soustružené tyče	164 mm
Počet nástrojů	12
Otáčky poháněných nástrojů	3 000 min ⁻¹
Celková hmotnost stroje	23 000 kg

6.2 Obráběcí nástroj

Pro obrábění kalené oceli a tento experiment byla vybrána monolitní vyměnitelná břitová destička z kubického nitridu boru s označením S-RNGN 120400 BBN27 S202 od firmy Walter CZ s.r.o. VBD má provedení ostří typu S dle značení firmy Walter CZ s.r.o., její rozměry a geometrie jsou uvedeny v tabulce 6.2 (více viz příloha 1). Doporučené řezné podmínky od výrobce pro danou vyměnitelnou břitovou destičku při obrábění kalené oceli (45 – 68 HRC) jsou v tabulce 6.3.

Tab. 6.2 Geometrie a provedení ostří VBD S-RNGN 120400 BBN27 S202.


	Tvar destičky		Provedení ostří	
	D [mm]	\check{s} [mm]	α [°]	L [mm]
	12,70	4,76	20	0,20
				

Tab. 6.3 Doporučené řezné podmínky pro VBD S-RNGN 120400 BBN27 S202.

Obráběný materiál	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Šířka záběru ostří a_p [mm]	Posuv na otáčku f [mm]
Kalená ocel (45 – 68 HRC) -plynulý a lehce přerušovaný řez	80 – 130	0,5 – 2,0	0,1 – 0,4
Kalená ocel (45 – 68 HRC) -silně přerušovaný řez	70 – 120	0,5 – 2,0	0,1 – 0,4

Pro danou VBD byl použit kompatibilní nožový držák firmy Sandvik Coromant s označením DRSNL 2525M 12 jehož grafický náhled a geometrie je uvedena v tabulce 6.4.

Tab. 6.4 Nožový držák od firmy Sandvik Coromant [53].

	Označení ISO	DRSNL 2525M 12
	Celková délka [mm]	150
	Funkční šířka [mm]	32
	Maximální vyložení [mm]	31,6
	Ortogonální úhel čela γ_o [°]	-6

Obr. 6.2 Nožový držák DRSNL 2525M 12 [53].

6.3 Materiál obrobku

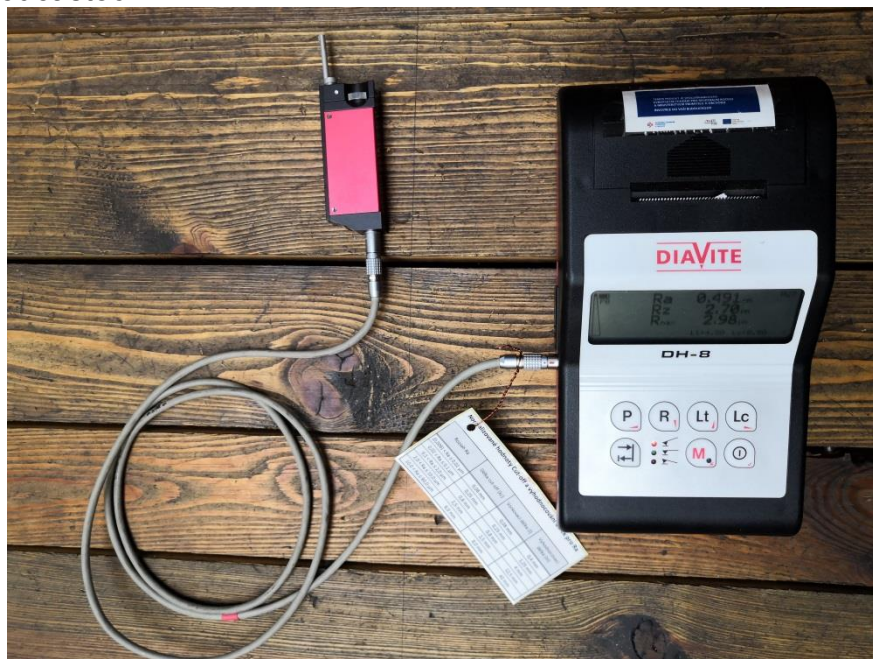
Obrobek je v podobě povrchově (indukčně) kalené tyče o průměru $D = 125$ mm a délce $L = 6\,000$ mm, jehož konce jsou obráběny soustružením na horizontálním soustruhu, viz kap. 6.1. Materiál obrobku je chrom-molybdenová ocel vhodná pro zušlechťování s číselným označením 1.7228 a označením dle ČSN EN 10 027-1 50CrMo4. Chemické složení, které udává dodavatel hutního materiálu společnosti KSK Precise Motion je v tabulce 6.5 a celý protokol viz příloha 2. Průběh tvrdosti v prokalené části obrobku znázorňuje graf, který je obsažen v příloze 3 a je získán od dodavatele. Tento průběh udává měření tvrdosti do hloubky 13 mm pod povrch polotovaru. Vychází z něj charakteristika, která udává, že do hloubky 8 mm od kaleného povrchu je tvrdost dle Rockwella průměrně 60,5 HRC. Výrazné snížení tvrdosti se projevuje až v hloubce větší než 10 mm od povrchu.

Tab. 6.5 Chemické složení chrom-molybdenové oceli 50CrMo4.

Chemické složení [hm. %]										
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V
0,480	0,730	0,240	0,011	0,004	1,030	0,160	0,170	0,170	0,018	0,007

6.4 Měřicí zařízení

Měření drsnosti obrobené plochy bylo prováděno drsnoměrem Diavite DH-8 (viz obr. 6.3), který byl poskytnut oddělením kontroly a kvality v rámci KSK Precise Motion a.s. Zařízení je schopné do paměti uložit 50 hodnot měření a lze volit měřenou délku. Pro měření daného experimentu byly nastaveny parametry $l_t = 4$ mm (vyhodnocovaná délka) a $l_c = 0,8$ mm (základní délka drsnosti) dle předpokládané dosažené drsnosti (viz kap. 6.5.2). Snímač je osazen diamantovým hrotem a tělo snímače má ve spodní části prizma, které umožňuje snadné měření právě na rotačních součástech.



Obr. 6.3 Drsnoměr Diavite DH-8 poskytnutý pro měření experimentu.

6.5 Provedení experimentálních zkoušek

Obrobek byl upnut do sklíčidla, s využitím koníka a lunety STA-5S od firmy Samchully byla zajištěna jeho přesná poloha. Do nožového držáku s označením DRSNL 2525M 12 od firmy Sandvik Coromant byla vložena vyměnitelná břitová destička S-RNGN 120400 BBN27 S202. Upnutí obrobku a pracovní prostor stroje je zobrazeno na obr. 6.4. Následně byly nastavovány řezné podmínky podle tabulky 6.6 a s každou změnou řezných podmínek byl obrobek obráběn po válcové povrchově kalené (průměrná tvrdost do hloubky 8 mm je 60,5 HRC) části v délce 35 mm. Místo řezu bylo po celou dobu procesu obrábění chlazeno přívodem procesní kapaliny. Při každé změně řezných podmínek byla pootočena vyměnitelná břitová destička, odebrán vzorek třísky (pro řezné podmínky s $a_p = 0,5$ mm vzorky odebrány nebyly). Před měřením drsnosti byl vždy povrch očištěn stlačeným vzduchem a čistým hadrem, až poté následovalo měření drsnosti (přesněji parametry R_a a R_z) na dvou různých místech obrobené plochy.

Tab. 6.6 Použité řezné podmínky při experimentu.

Č. měření	Šířka záběru ostří a_p [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]
1	0,5	80	205	konst. 0,25
2		110	282	
3		140	360	
4		170	436	
5	1	80	207	
6		110	285	
7		140	362	
8		170	440	
9	2	80	210	
10		110	289	
11		140	368	
12		170	447	



Obr. 6.4 Pracovní prostor stroje s upnutým obrobkem před začátkem experimentu.

6.5.1 Naměřené hodnoty Ra a Rz

Hodnoty získané z měření parametrů drsnosti byly zaneseny do tabulek 6.7 až 6.9. Kde hodnoty Ra_1 , Ra_2 , Rz_1 a Rz_2 představují jednotlivé hodnoty získané z měření na obrobené ploše danými řeznými podmínkami dle tabulky 6.6. U těchto hodnot byl proveden následně aritmetický průměr a byly získány výsledné hodnoty drsnosti Ra a Rz .

Tab. 6.7 Hodnoty drsnosti povrchu Ra a Rz pro řezné podmínky s $a_p = 0,5$ mm.

Šířka záběru ostří a_p [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Ra_1 [μm]	Ra_2 [μm]	Arit. průměr Ra [μm]	Rz_1 [μm]	Rz_2 [μm]	Arit. průměr Rz [μm]
0,5	80	0,391	0,423	0,407	2,15	2,21	2,180
	110	0,670	0,658	0,664	2,98	2,81	2,895
	140	0,591	0,598	0,595	2,74	2,79	2,765
	170	0,367	0,381	0,374	2,02	2,10	2,060

Tab. 6.8 Hodnoty drsnosti povrchu Ra a Rz pro řezné podmínky s $a_p = 1$ mm.

Šířka záběru ostří a_p [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Ra_1 [μm]	Ra_2 [μm]	Arit. průměr Ra [μm]	Rz_1 [μm]	Rz_2 [μm]	Arit. průměr Rz [μm]
1	80	0,391	0,402	0,397	2,21	2,27	2,240
	110	0,423	0,428	0,426	2,20	2,25	2,225
	140	0,448	0,451	0,450	2,45	2,48	2,465
	170	0,653	0,648	0,651	3,01	3,09	3,050

Tab. 6.9 Hodnoty drsnosti povrchu Ra a Rz pro řezné podmínky s $a_p = 2$ mm.

Šířka záběru ostří a_p [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Ra_1 [μm]	Ra_2 [μm]	Arit. průměr Ra [μm]	Rz_1 [μm]	Rz_2 [μm]	Arit. průměr Rz [μm]
2	80	0,514	0,501	0,508	2,97	2,72	2,845
	110	0,581	0,558	0,570	4,30	4,10	4,200
	140	0,502	0,515	0,509	2,87	2,81	2,840
	170	0,505	0,491	0,498	2,80	2,70	2,750

6.5.2 Výpočet teoretické hodnoty drsnosti

Dle zadaných řezných podmínek (viz tab. 6.6) a geometrie vyměnitelné břitové destičky (viz tab. 6.2) lze vypočítat teoretické hodnoty průměrné aritmetické úchytky profilu Ra_t a teoretickou hodnotu největší výšky profilu Rz_t . Poloměr špičky nástroje r_ε se pro danou vyměnitelnou břitovou destičku S-RNGN 120400 BBN27 S202 rovná jejímu průměru $D = 12,70$ mm.

Teoretická hodnota průměrné aritmetické úchytky profilu Ra_t se vypočítá podle vztahu (5.2):

$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot f^2}{18 \cdot \sqrt{3} \cdot r_\varepsilon} \quad [\mu m]$$

$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot 0,25^2}{18 \cdot \sqrt{3} \cdot 12,70} = 0,1578 \mu m \quad (6.1)$$

Jelikož je poloměr špičky $r_\varepsilon > 0$ vypočítá se teoretická hodnota největší výšky profilu Rz_t podle vztahu (5.4):

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

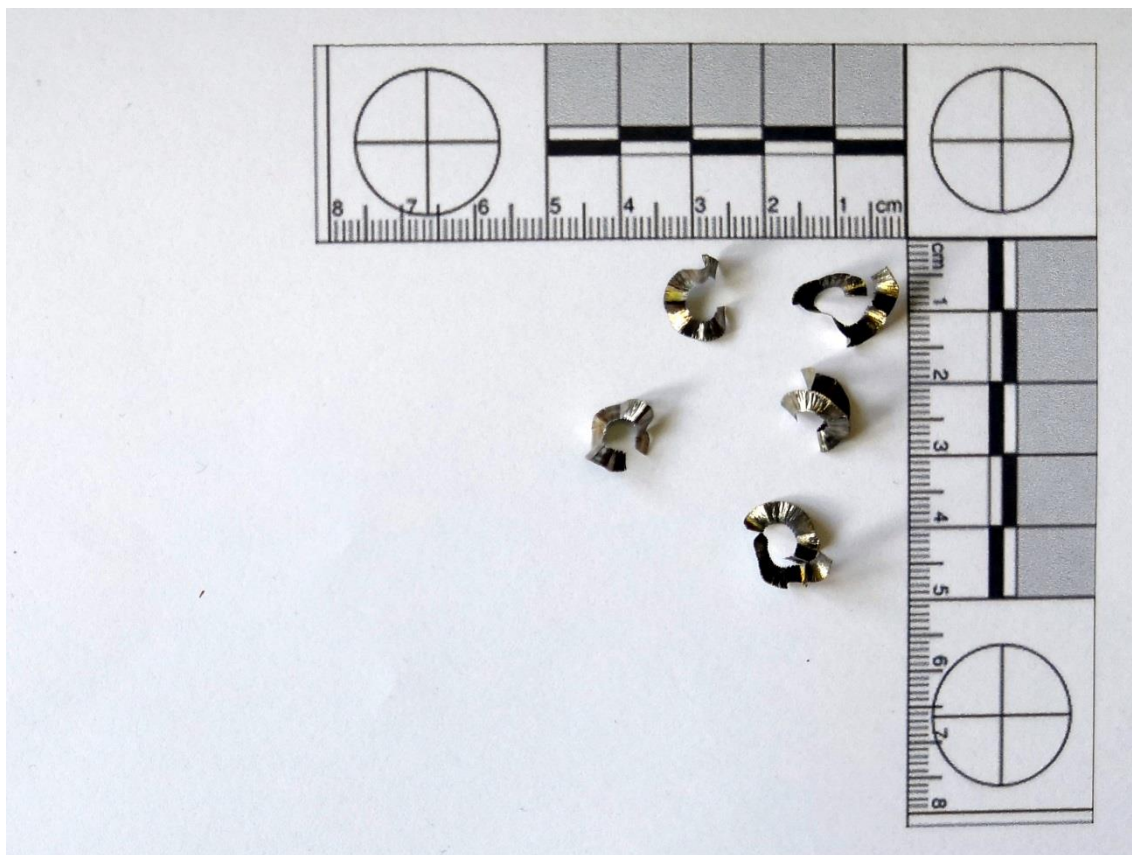
$$Rz_t = \left(12,7 - \sqrt{12,7^2 - 0,25 \cdot 0,25^2} \right) \cdot 10^3 = 0,6152 \mu m \quad (6.2)$$

6.5.3 Vzorky třísek

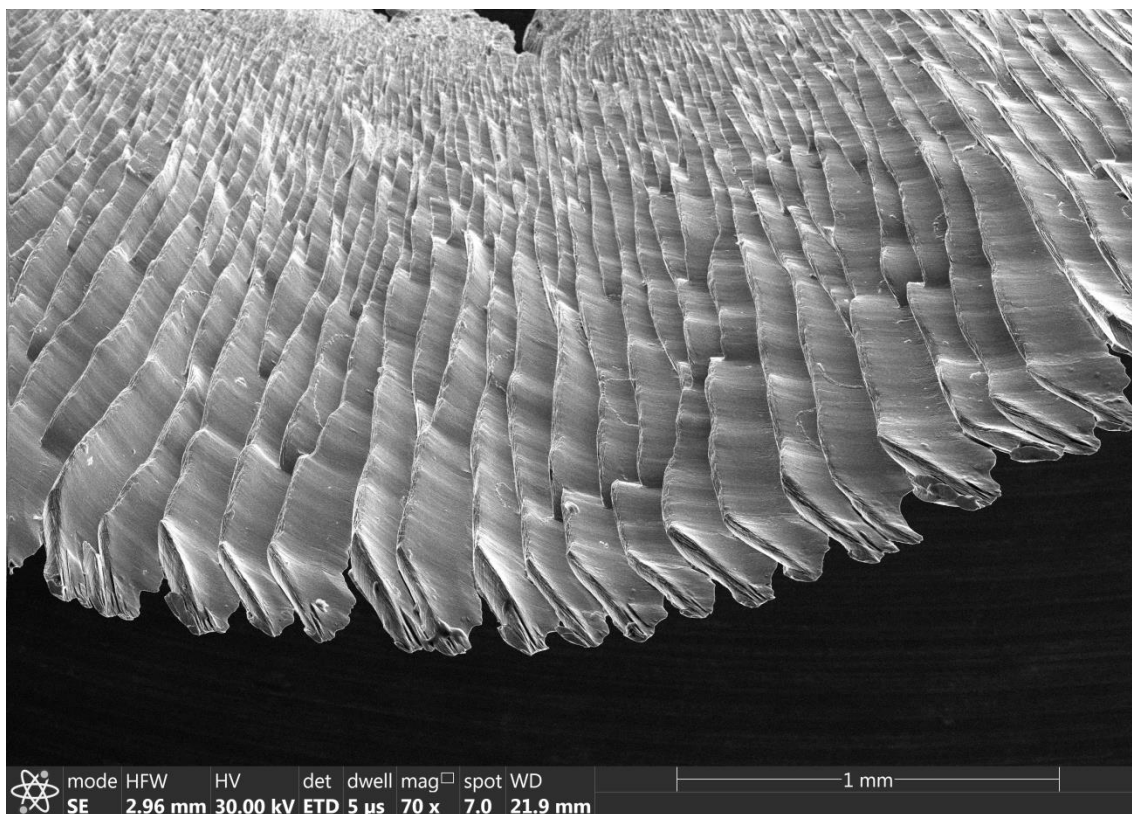
Při jednotlivých změnách řezných podmínek, viz tab. 6.10, byly odebírány vzorky třísek (kromě případu s $a_p = 0,5$ mm, kde tříska byla příliš malá a proud procesní kapaliny jí roznesl po celém pracovním prostoru a nebylo tak možné jednotlivé třísky rozlišit) z obráběného materiálu 50CrMo4. Vzorky třísek byly následně nafoceny pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu a fotoaparátu.

Tab. 6.10 Použité řezné podmínky při experimentu s odkazy na jednotlivé vzorky třísek.

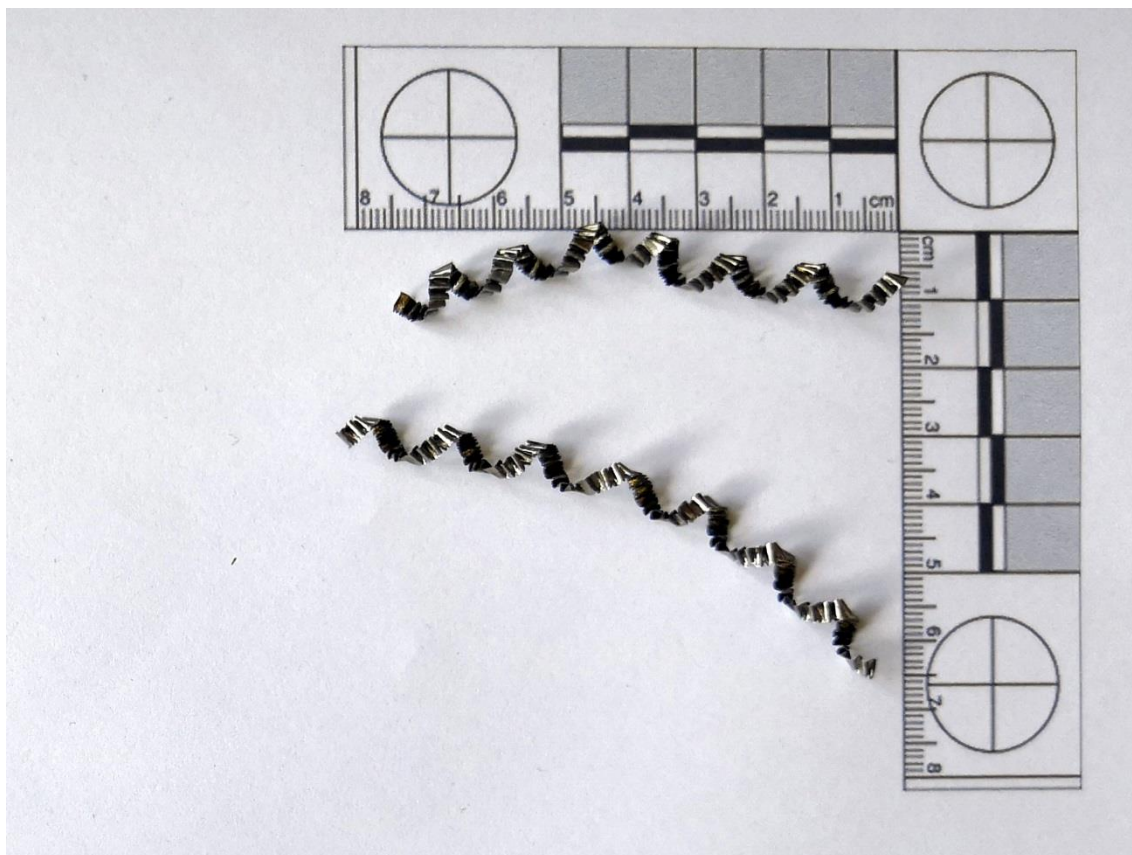
Č. měření	Šířka záběru ostří a_p [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]	Číslo obr. třísky pro dané měření
1	0,5	80	konst. 0,25	–
2		110		–
3		140		–
4		170		–
5	1	80		Obr. 6.5 – 6.6
6		110		Obr. 6.7 – 6.8
7		140		Obr. 6.9 – 6.10
8		170		Obr. 6.11 – 6.12
9	2	80		Obr. 6.13 – 6.14
10		110		Obr. 6.15 – 6.16
11		140		Obr. 6.17 – 6.18
12		170		Obr. 6.19 – 6.20



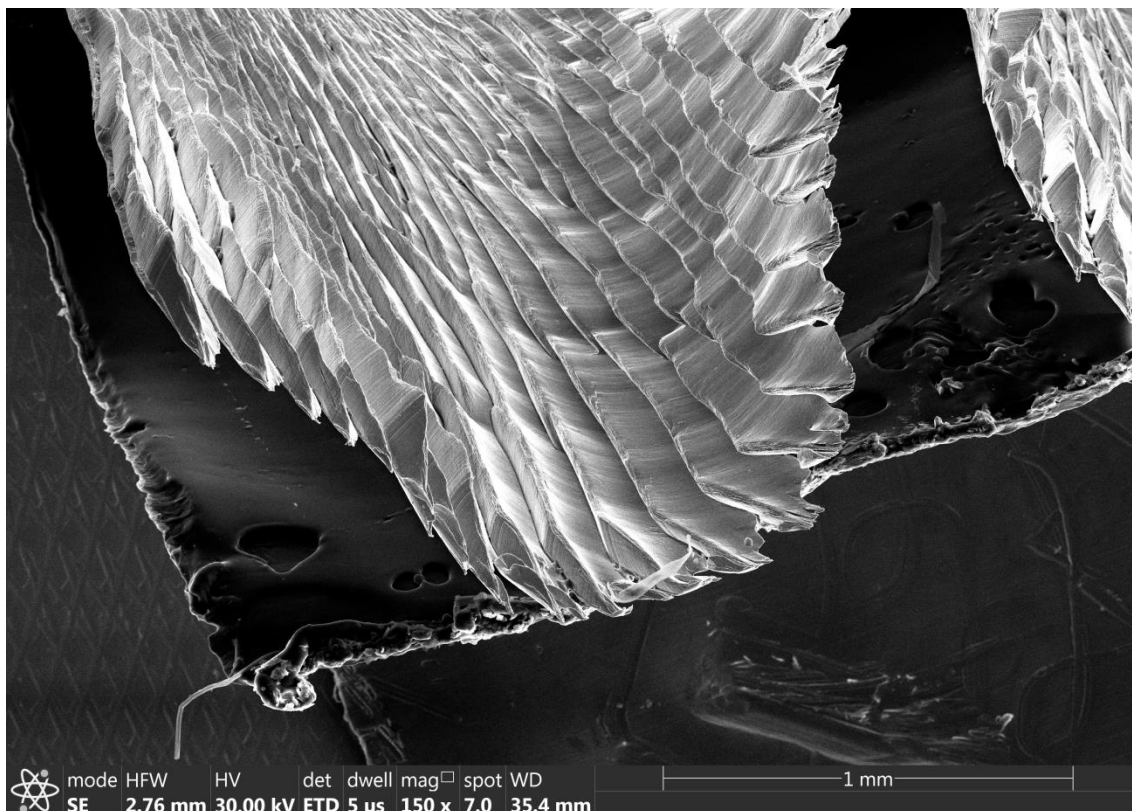
Obr. 6.5 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 1 \text{ mm}$ a $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



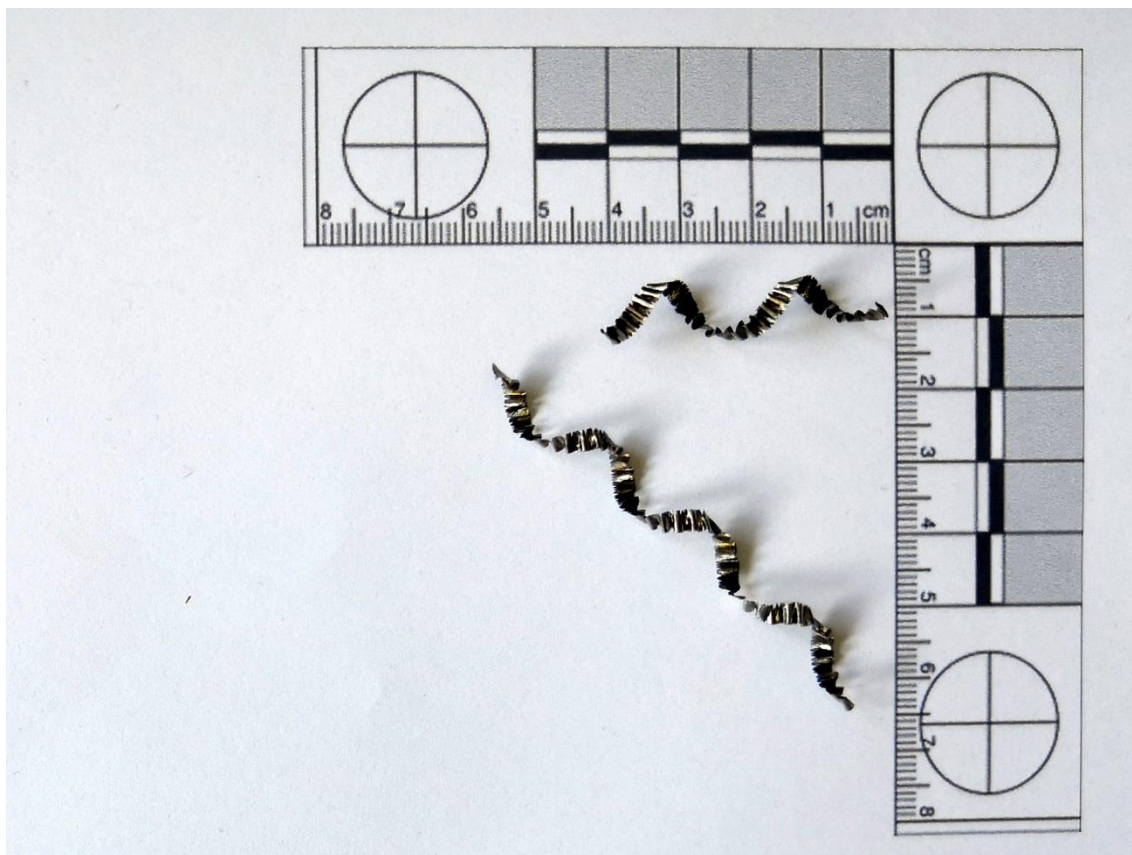
Obr. 6.6 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 1 \text{ mm}$ a $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ z SEM mikroskopu.



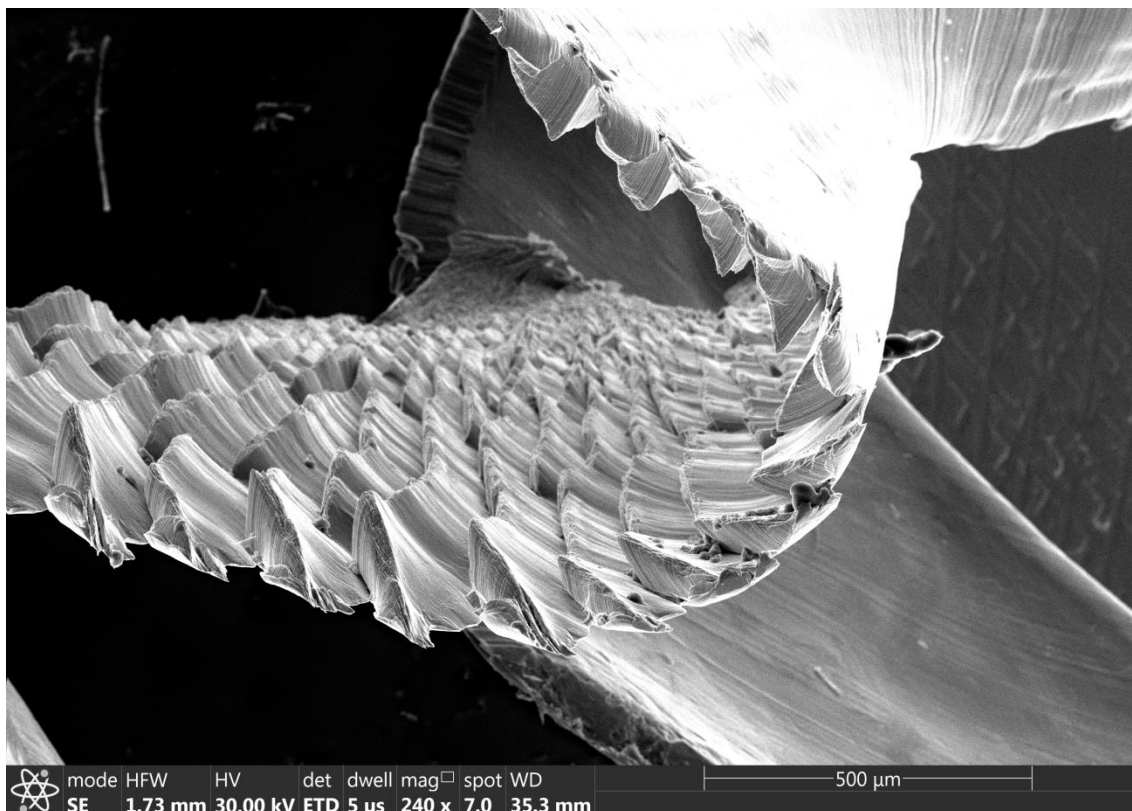
Obr. 6.7 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 1 \text{ mm}$ a $v_c = 110 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



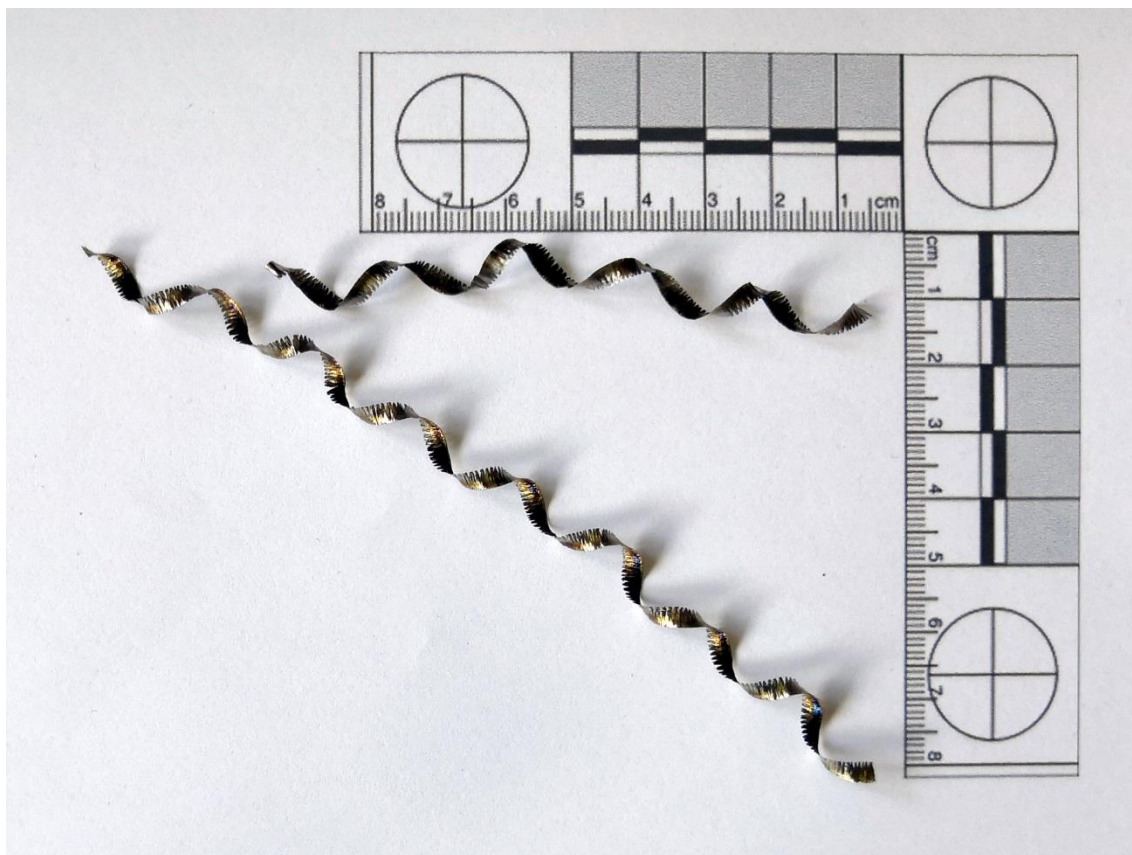
Obr. 6.8 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 1 \text{ mm}$ a $v_c = 110 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ z SEM mikroskopu.



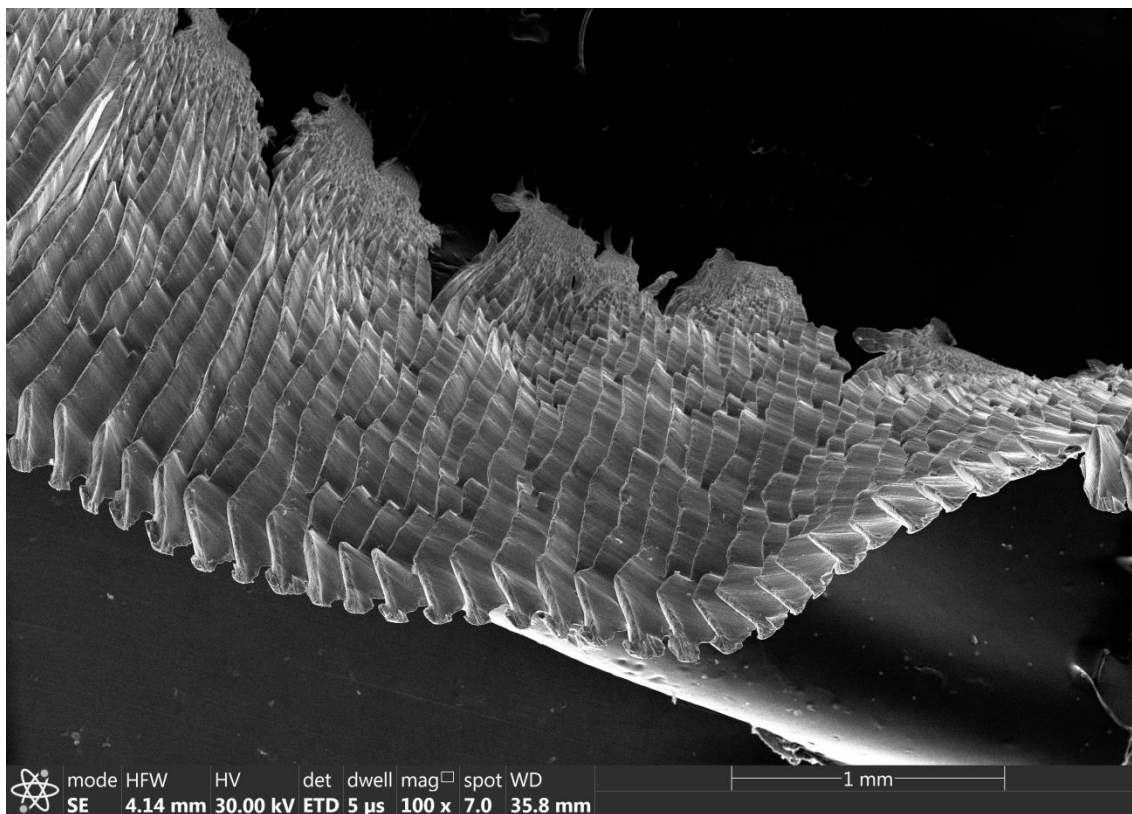
Obr. 6.9 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 1$ mm a $v_c = 140$ m.min⁻¹.



Obr. 6.10 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 1$ mm a $v_c = 140$ m.min⁻¹ z SEM mikroskopu.



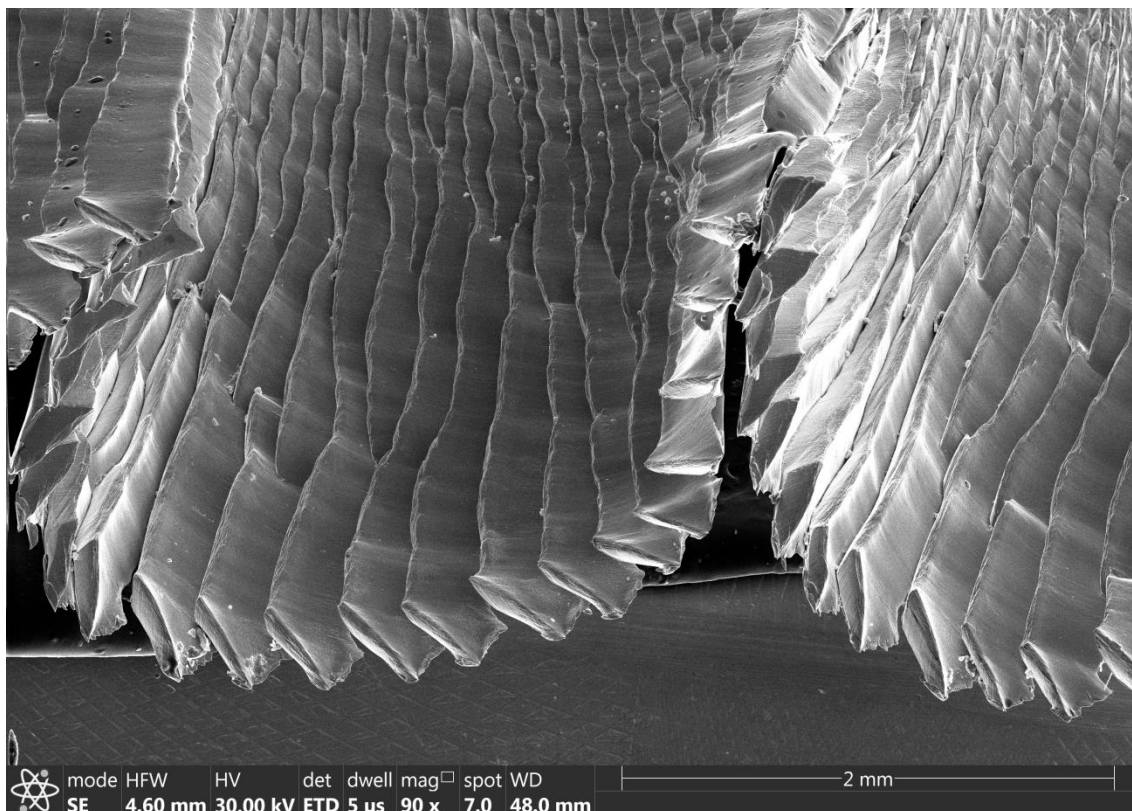
Obr. 6.11 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 1 \text{ mm}$ a $v_c = 170 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



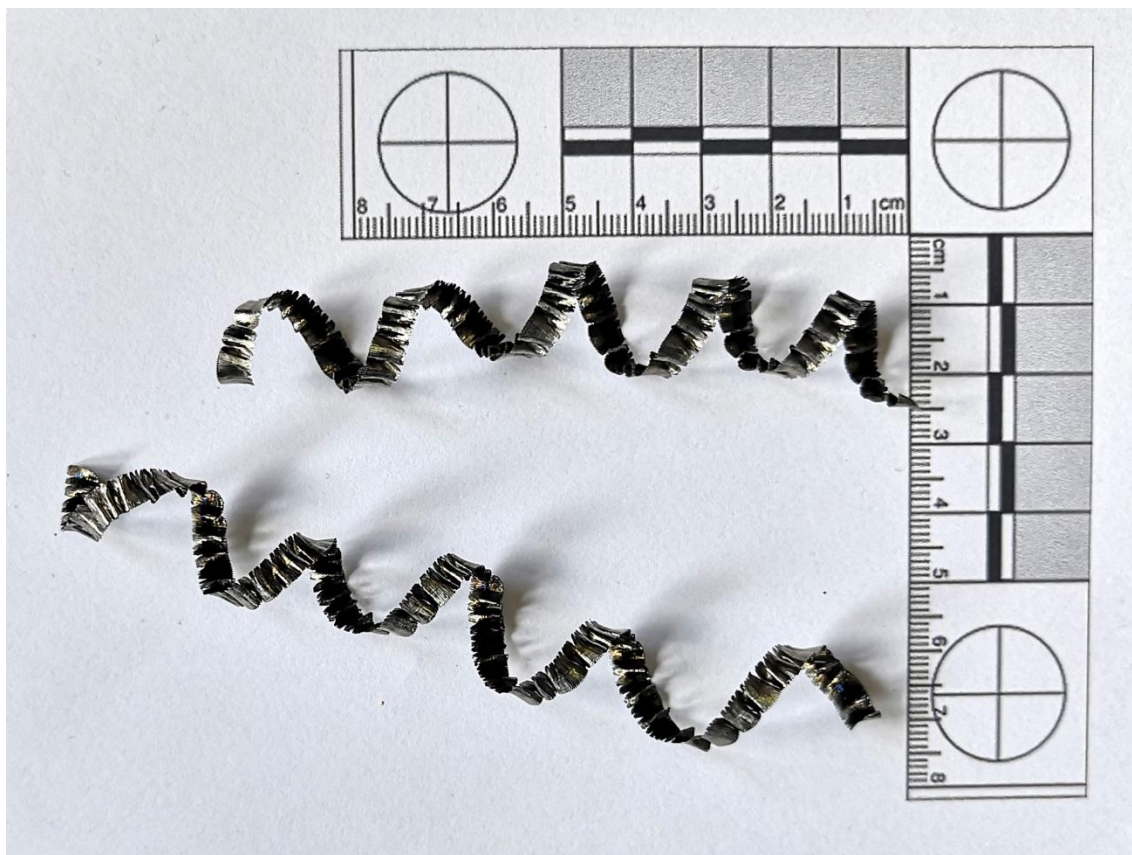
Obr. 6.12 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 1 \text{ mm}$ a $v_c = 170 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ z SEM mikroskopu.



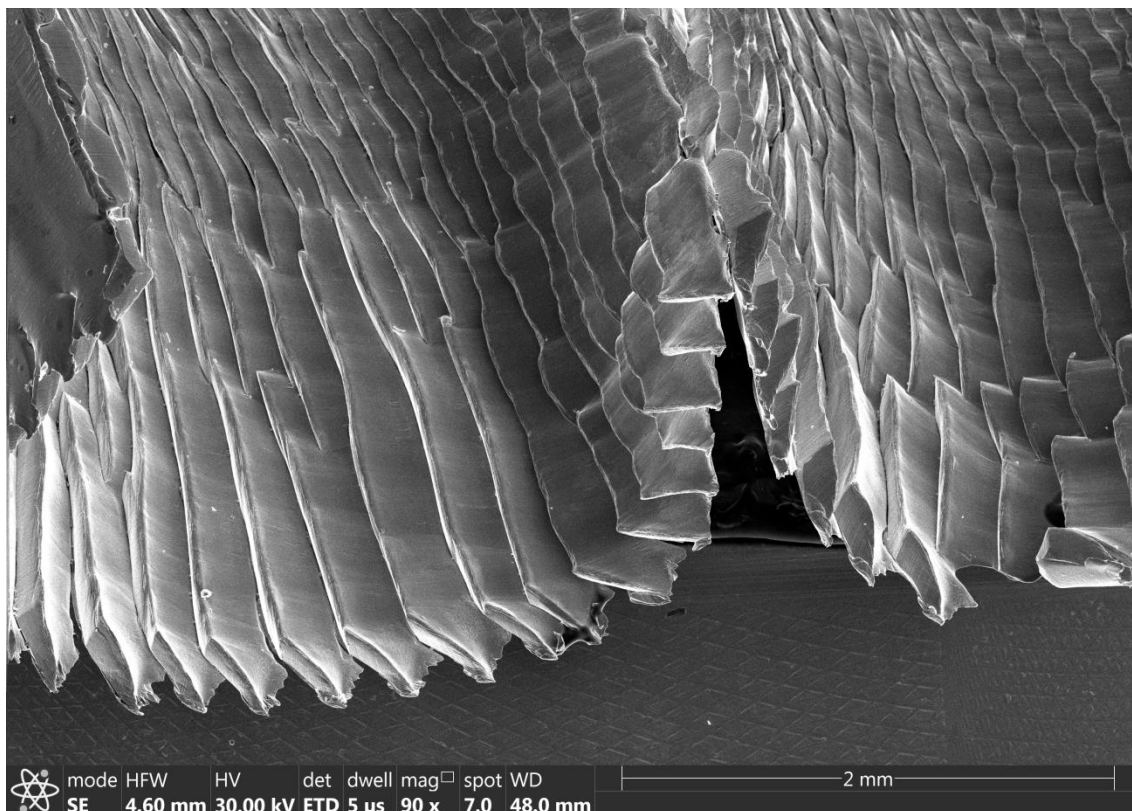
Obr. 6.13 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.



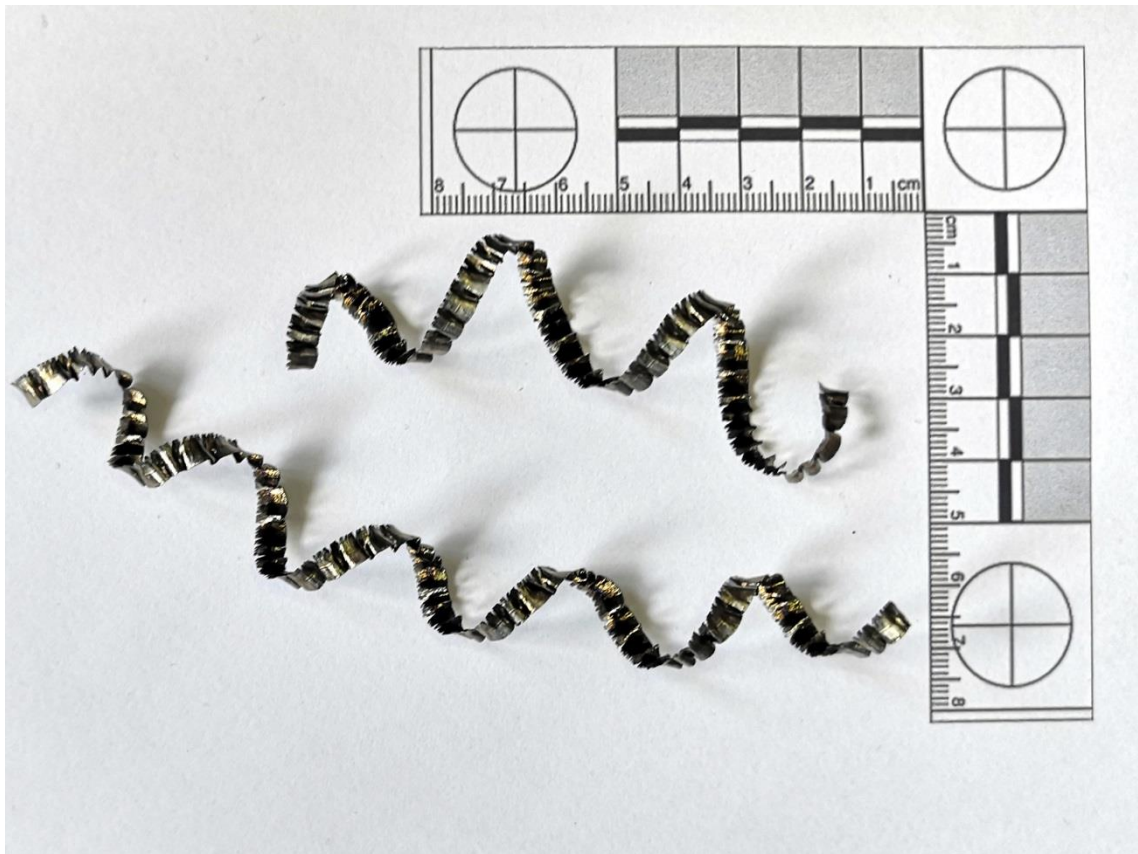
Obr. 6.14 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ z SEM mikroskopu.



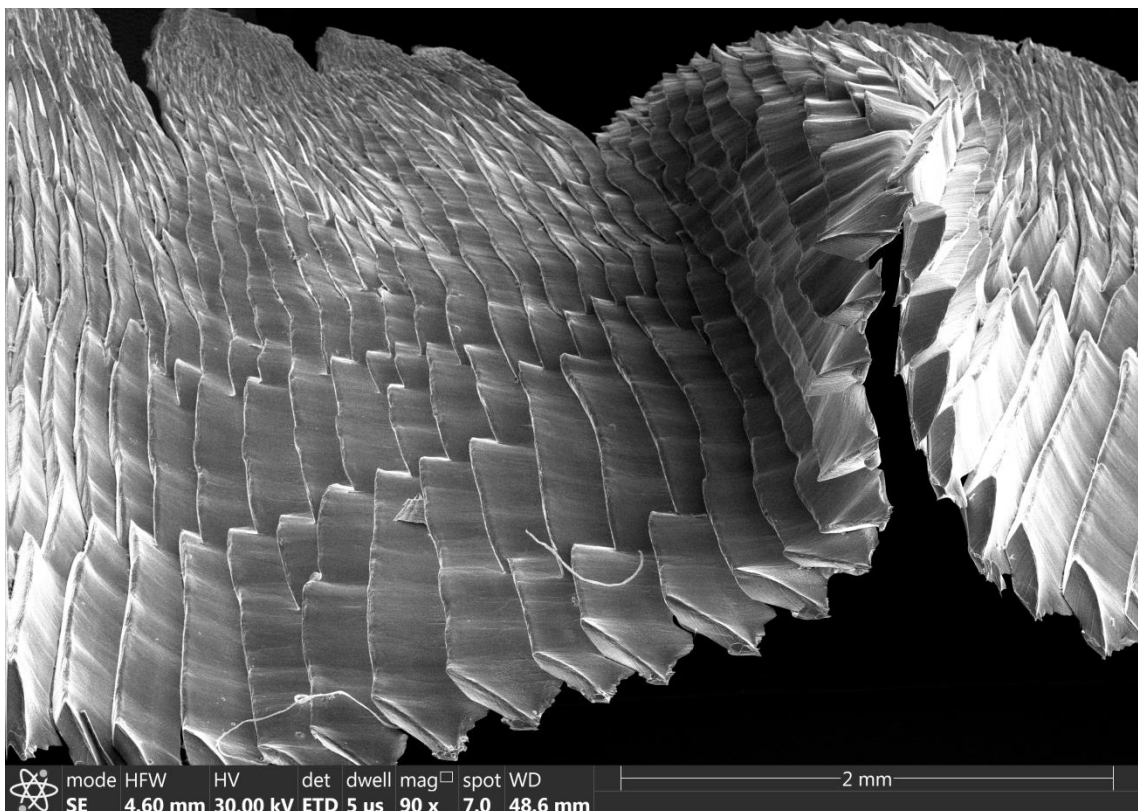
Obr. 6.15 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.



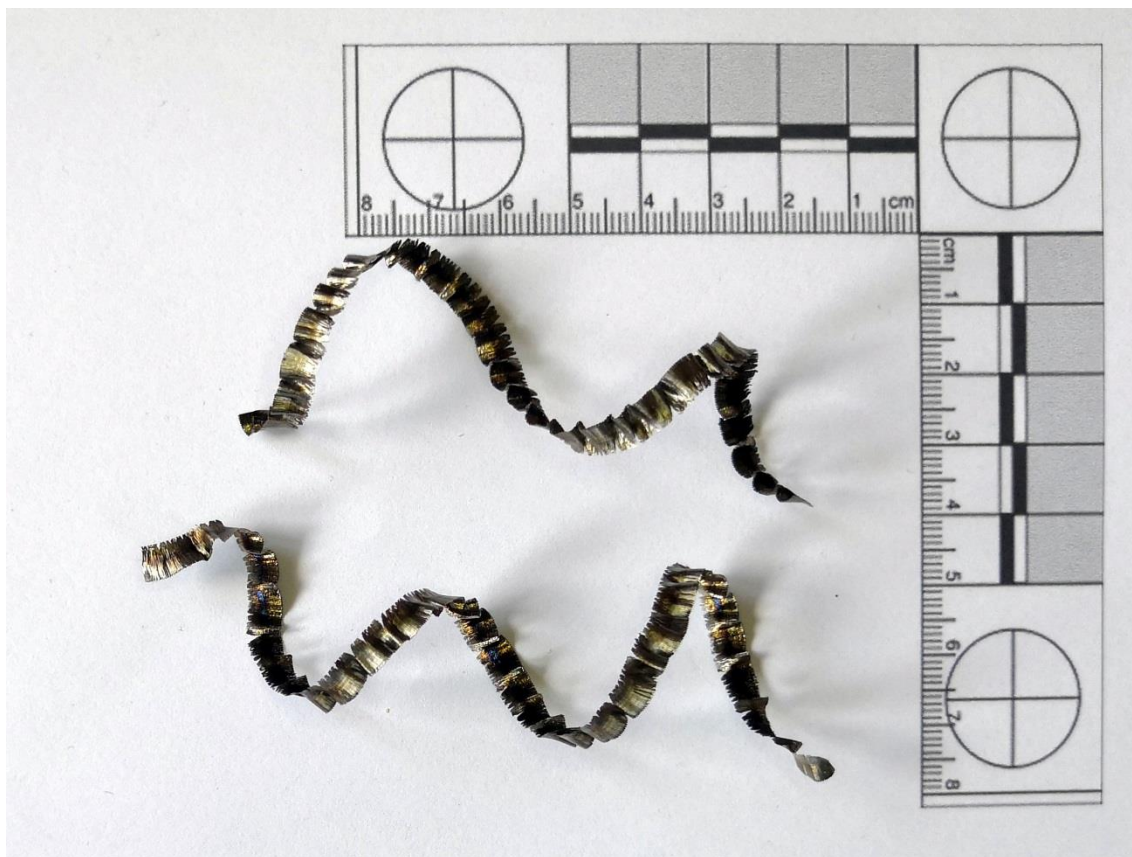
Obr. 6.16 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ z SEM mikroskopu.



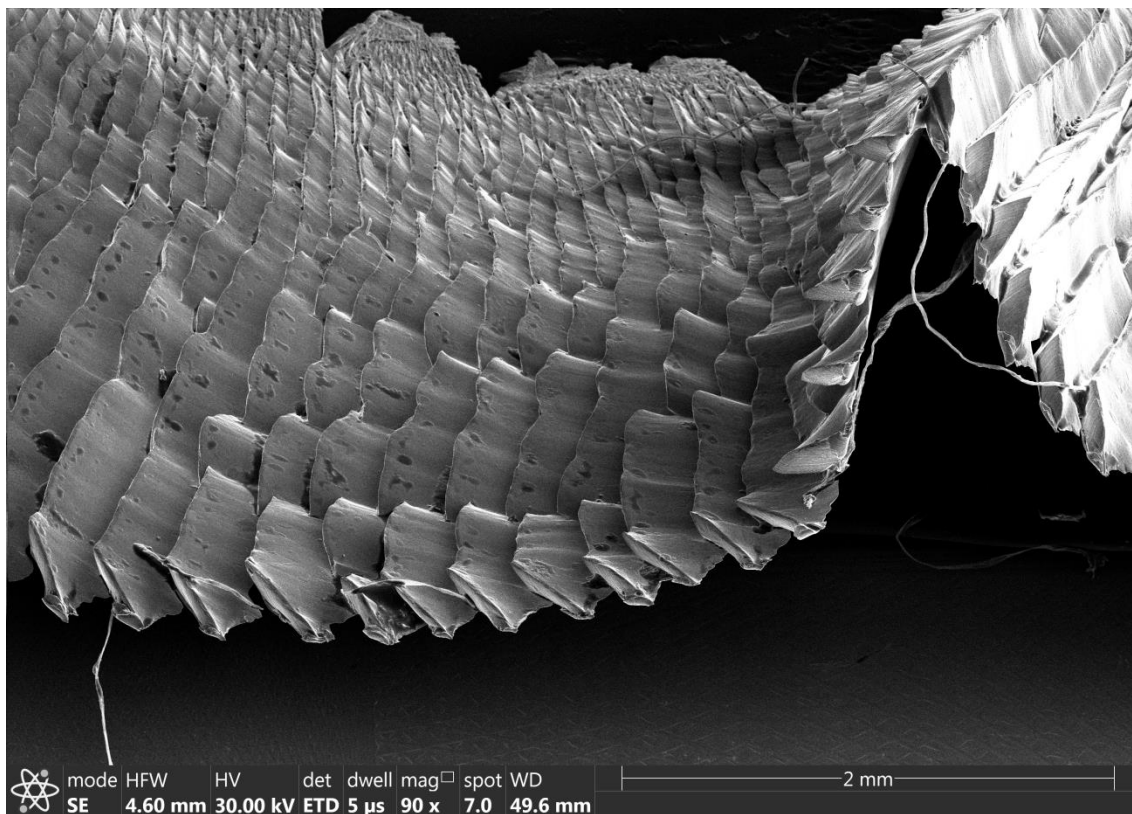
Obr. 6.17 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_c = 140 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 6.18 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_c = 140 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ z SEM mikroskopu.



Obr. 6.19 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_c = 170 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 6.20 Vzorek třísky pro řezné podmínky $a_p = 2 \text{ mm}$ a $v_c = 170 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ z SEM mikroskopu.

6.5.4 Vyhodnocení získaných hodnot

Po provedení experimentu a získání všech dostupných informací byly naměřené hodnoty (viz tab. 6.7 až 6.9) vyneseny do grafu pomocí statistického softwaru NCSS. Obr. 6.21 znázorňuje průměrnou aritmetickou úchylku profilu R_a v závislosti na řezných podmínkách, tedy na šířce záběru ostří a_p a řezné rychlosti v_c . Na obr. 6.22 je znázorněna největší výška profilu R_z v závislosti na stejných výše zmíněných řezných podmínkách.

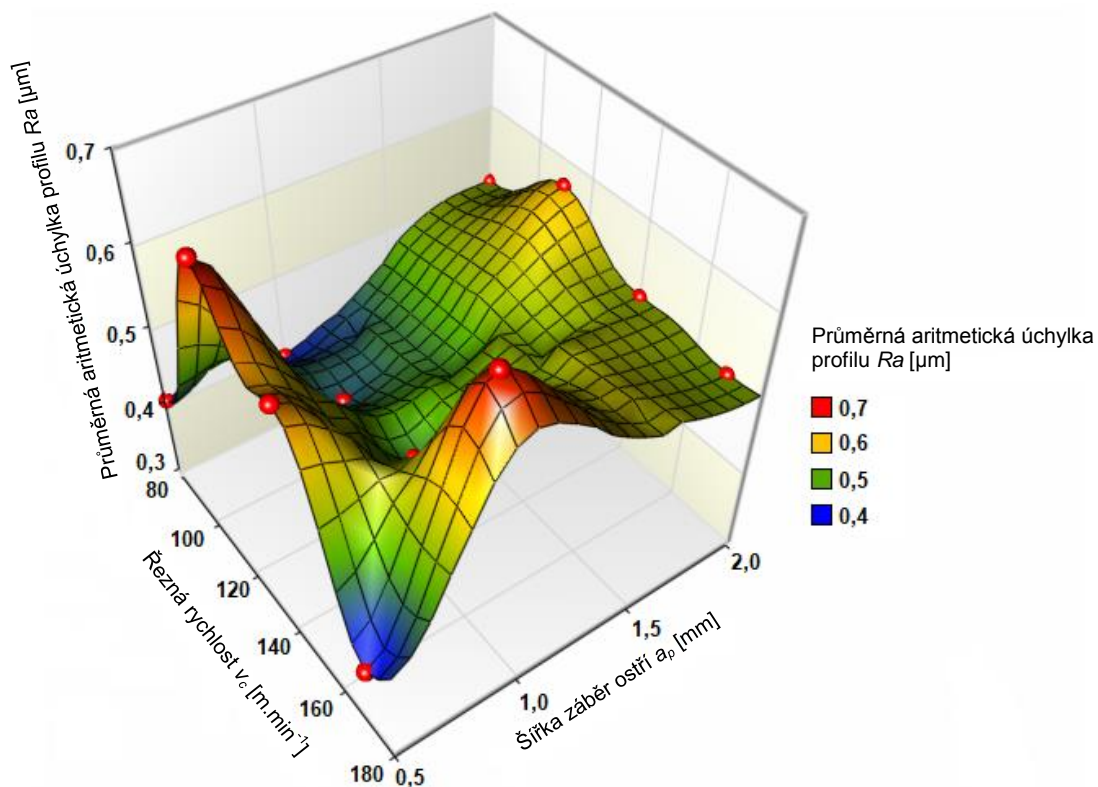
Z grafů je zřejmé, že nejstabilnějších výsledků v pásmu doporučené řezné rychlosti pro plynulý řez ($v_c = 80$ až 130 m.min⁻¹) od výrobce vyměnitelné břitové destičky S-RNGN 120400 BBN27 S202 bylo dosaženo v případě, kdy hodnota šířky záběru ostří a_p nabývala hodnoty 1 mm. V tomto pásmu parametr R_a dosahuje hodnot 0,40 – 0,45 μm a parametr R_z hodnot 2,245 – 2,450 μm . V případě nastavených řezných podmínek pro číslo měření 2 ($a_p = 0,5$ mm a $v_c = 110$ m.min⁻¹), 8 ($a_p = 1$ mm a $v_c = 170$ m.min⁻¹) a 10 ($a_p = 2$ mm a $v_c = 110$ m.min⁻¹) byl proces obrábění doprovázen nežádoucím zvukem, který byl způsoben vibracemi v soustavě S-N-O. Nepříznivé intenzivní vibrace zvyšují opotřebení nástroje, zhoršují pracovní prostředí a mají vliv na kvalitu obrobenej plochy, které se projevily výrazným nárůstem parametrů R_a i R_z , které jsou patrné v grafech (viz obr. 6.21 – 22). Snížit vibrace lze zvýšením, případně snížením řezné rychlosti v_c resp. otáčkami n .

Při obrábění řeznými podmínkami s $a_p = 2$ mm bylo docíleno (až na případ, kde řezná rychlost byla $v_c = 110$ m.min⁻¹) stabilních výsledků hodnot R_a i R_z .

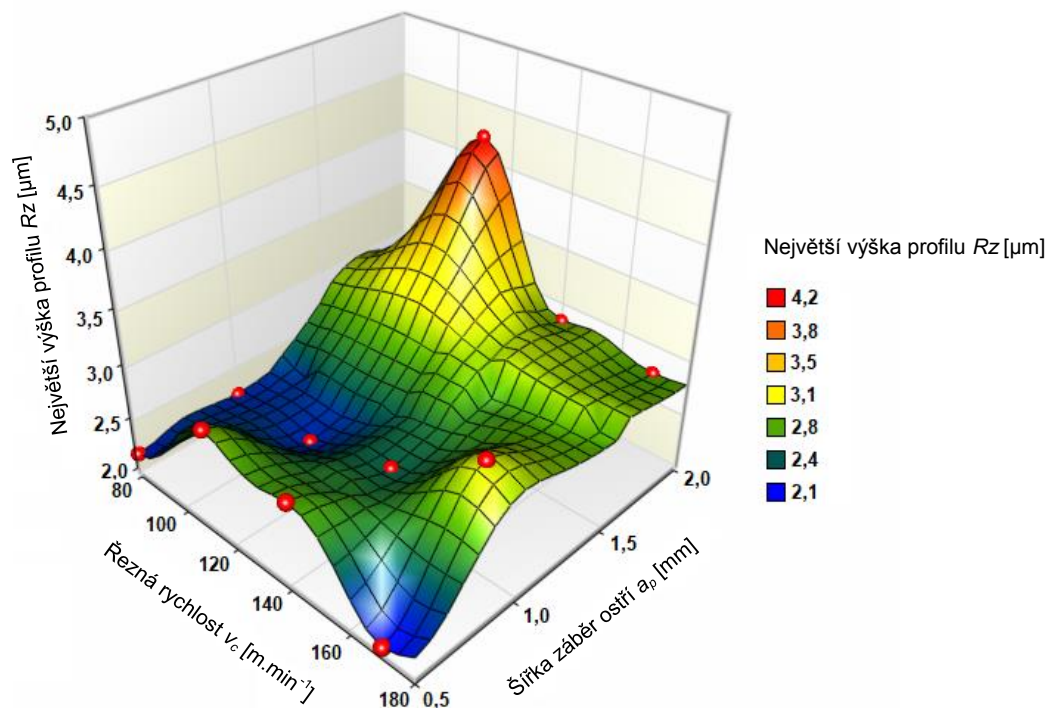
Zatímco v případě řezných podmínek s šířkou záběru ostří $a_p = 0,5$ mm byly výsledné hodnoty parametrů R_a i R_z velice proměnlivé, při měření číslo 4, kde byla řezná rychlost $v_c = 170$ m.min⁻¹ bylo dosaženo nejnižších hodnot obou měřených parametrů drsnosti ($R_a = 0,374$ μm a $R_z = 2,060$ μm), které se nejvíce přibližovaly teoretickým hodnotám parametrů drsnosti povrchu (viz kap. 6.5.2).

Z obrázků třísek 6.5 až 6.20 je zřejmé, že se změnou řezných parametrů docházelo i ke změně utvářené třísky. Z odebraných vzorků třísek se ve většině případů jednalo o segmentové vinuté krátké třísky, které však v detailnějším pohledu mají charakter obloukovité spojené třísky a jsou charakteristické právě při obrábění kalených ocelí. Na obrázcích z rastrovacího elektronového mikroskopu jsou zřetelně vidět jednotlivé segmenty třísky, způsobené soustředěním primární plastické deformace do střížné roviny, která odděluje téměř nedeformované segmenty od obráběného materiálu.

Hodnota délky segmentů se pro řezné podmínky s šířkou záběru ostří $a_p = 1$ mm pohybovala v rozmezí 151 až 185 μm a pro $a_p = 2$ mm byla v rozmezí 257 – 319 μm . Odlišné třísky vznikali v případě měření 5 ($a_p = 1$ mm a $v_c = 80$ m.min⁻¹), kde tříska byla krátká a dělila se průměrně po jednom závitě šroubovice a společně s měřením č. 8 ($a_p = 1$ mm a $v_c = 170$ m.min⁻¹) měly třísky „hladký“ charakter a nebyly obloukovitě spojené.



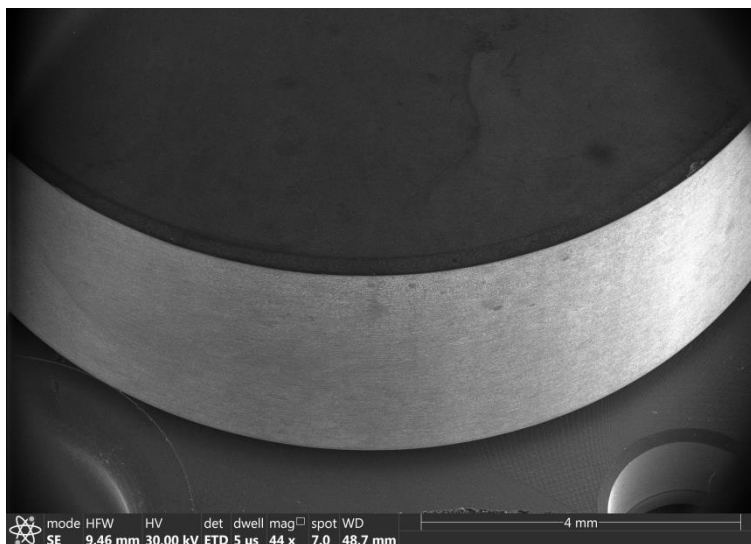
Obr. 6.21 Graf vyhodnocení naměřené průměrné aritmetické úchylky profilu R_a při soustružení povrchově kalené oceli 50CrMo4 (60,5 HRC).



Obr. 6.22 Graf vyhodnocení naměřené největší výšky profilu R_z při soustružení povrchově kalené oceli 50CrMo4 (60,5 HRC).

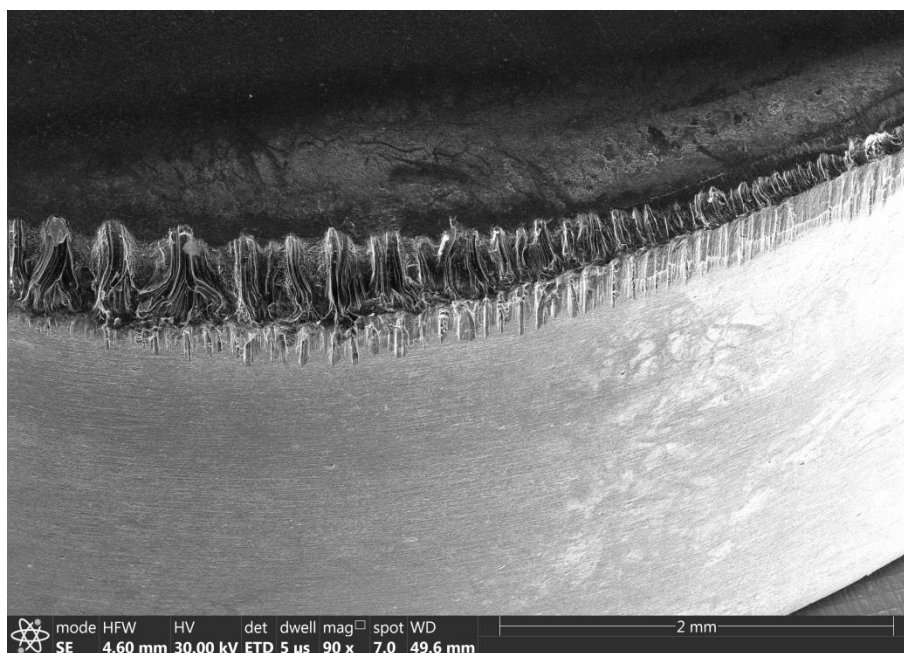
6.6 Opotřebení vyměnitelné břitové destičky

Při měření experimentu ve společnosti KSK Precise Motion a.s. byly pro zpracování této diplomové práce poskytnuty vyměnitelné břitové destičky S-RNGN 120400 BBN27 S202, které byly následně se vzorky třísek nafoceny rastrovacím elektronovým mikroskopem. Na obr. 6.23 je zobrazen stav nové vyměnitelné břitové destičky a je patrné ostří s fazetkou, která dle tab. 6.2 má délku 0,2 mm.

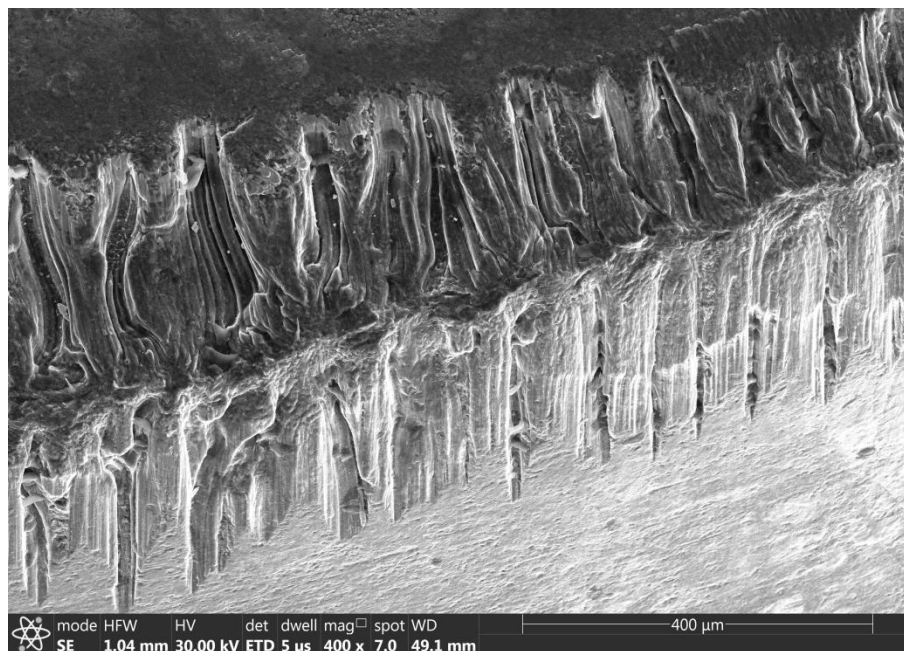


Obr. 6.23 Stav břitu u nové vyměnitelné břitové destičky S-RNGN 120400 BBN27 S202.

Na obr. 6.24 je zobrazena VBD jenž byla použita v běžné výrobě KSK Precise Motion s reznými podmínkami $a_p = 2,2$ mm, $v_c = 130$ m.min⁻¹ a $f = 0,25$ mm, kde je znatelné abrazivní opotřebení v podobě rýh způsobených tvrdými částicemi obsaženými v povrchově kalené oceli 50CrMo4 a částicemi uvolněnými z břitu destičky. V detailnějším pohledu (viz obr. 6.25) jsou znatelné jednotlivé rýhy na čele i hřbetu nástroje.

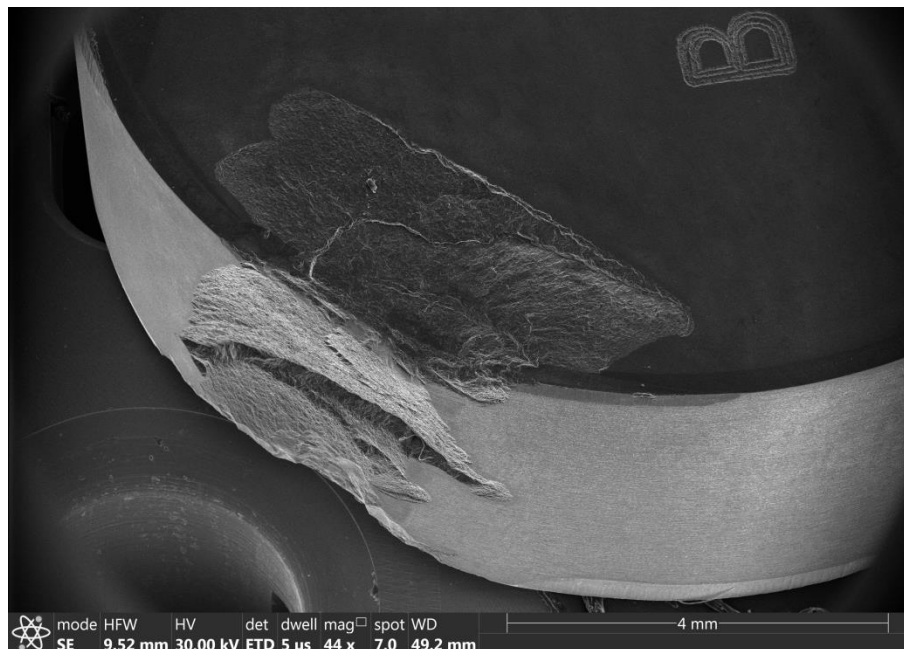


Obr. 6.24 Opotřebení VBD S-RNGN 120400 BBN27 S202.



Obr. 6.25 Detailní pohled na opotřeбенý břit VBD destičky S-RNGN 120400 BBN27 S202.

Pokud destička není včas pootočena na již neopotřeбенou část, případně vyměněna za novou, může vzrůstající opotřeбенí, a tím vzrůstající řezná síla zapříčinit lom břitu nebo destičky. Tomuto efektu lze zabránit včasnou výměnou destičky, případně snížením šířky záběru ostří, řezné rychlosti nebo použitím destičky s fazetkou. Obrázek 6.26 zobrazuje lom destičky, který byl způsoben vzrůstajícím opotřeбенím břitu.



Obr. 6.26 Lom břitové destičky S-RNGN 120400 BBN27 S202.

7 DISKUSE

Na kvalitu obrobené plochy tedy parametry Ra a Rz má z řezných podmínek jednoznačně vliv posuv na otáčku f , toto tvrzení potvrzuje literatura [43] a vyplývá i ze vzorců pro výpočet teoretických hodnot Ra_t a Rz_t (5.2) a (5.4). Se vzrůstajícím posuvem na otáčku vzrůstají i hodnoty drsnosti povrchu, zatímco zvyšující se poloměr špičky r_ε má opačný vliv na drsnost povrchu, proto při daném experimentu byly tyto parametry konstantní. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že vzrůstající hodnota šířky záběru ostří má příznivý vliv pro získání konzistentních stabilních hodnot parametrů drsnosti, avšak se zhoršující se kvalitou povrchu. Zatímco s rostoucí řeznou rychlostí nebyla pozorována výrazná změna a jednotný trend pro dané podmínky soustružení povrchově kalené oceli. Literatura [43] uvádí, že s rostoucí řeznou rychlostí by mělo být pozorovatelné relativně malé postupné snižování hodnot Ra , avšak řezné podmínky při daném experimentu byly nastaveny pro dokončovací soustružení. Jedním z omezujících parametrů pro získání přesnějších hodnot byl rozměr polotovaru a pro daný experiment by bylo vhodnější zvolit polotovar menších rozměrů a získání tak vyšší tuhosti obrobku. V případech měření, kde docházelo k intenzivním vibracím doprovázeným akustickou emisí, by bylo vhodné měření opakovat v jiném místě obrobku, případně se změnou řezné rychlosti, aby došlo k ustálení procesu obrábění.

Odebrané vzorky třísek potvrdily mechanismus jejich vzniku, který byl popsán v teoretické části práce a podle snímků v kap. 6.5.3 je zřejmé koncentrování primární plastické deformace při odebrání materiálu do střížné roviny a vznik jednotlivých segmentů třísky, které uvádí i literatury [43, 49].

ZÁVĚR

Předmětem diplomové práce byl teoretický rozbor problému obrábění těžkoobrobitelných materiálů. V práci byly specifikovány a rozděleny těžkoobrobitelné materiály a příčiny zhoršení jejich obrobitelnosti s možným řešením daného problému.

Dále se práce zaměřila na kalené oceli, metody tepelného zpracování a vhodné materiály pro kalení a zušlechťování. Jsou zde také charakterizovány nástrojové materiály vhodné pro obrábění kalených ocelí. Těmito nástrojovými materiály jsou převážně povlakované slinuté karbidy, řezná keramika, přesněji směsná a vyztužená keramika a syntetický nástrojový materiál kubický nitrid boru, který je vhodný právě pro obrábění materiálů s tvrdostí nad 45 HRC.

Na mechanismus a formu opotřebení vyměnitelných břitových destiček a na mechanismus tvorby třísky je zaměřena následující část. Objasňuje způsoby opotřebení řezných nástrojů, které jsou způsobovány vysokými teplotami při obrábění a tvrdými částicemi vyskytujícími se v obráběném materiálu. Tvorbu třísky při obrábění kalené oceli, která se řadí mezi jeden z těžkoobrobitelných materiálů, má odlišnou formu a tříška má tedy charakteristický segmentový vzhled.

V poslední části byl experimentálně zkoumán vliv řezných podmínek, přesněji řezné rychlosti a šířky záběru ostří na parametry drsnosti obrobené plochy při soustružení povrchově kalené oceli řezným nástrojem s vyměnitelnou břitovou destičkou z kubického nitridu boru. Výsledky byly následně vyhodnoceny a porovnány. Odebrané vzorky třísek při soustružení potvrdily mechanismus tvorby třísky dle teoretických poznatků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [2] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [3] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [4] HUMÁR, A. Technologie I – Technologie obrábění – 1. Část. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT – FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2003. 138 s. [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [5] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [6] NESLUŠAN, Miroslav. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [7] Výrobky z ocelí korozivzdorných. *Bohdan Bolzano* [online]. Kladno, 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych>
- [8] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [9] ISO M Korozivzdorné oceli. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx
- [10] Nikl a jeho slitiny Titan a jeho slitiny. *Západočeská univerzita v Plzni: Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň, 2009 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf
- [11] Použití řezné kapaliny a chlazení při soustružení. *Sandvik Coromant* [online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning.aspx>
- [12] ISAKSON, Simon, M. Ibrahim SADIK, Amir MALAKIZADI a Peter KRAJNIK. Effect of cryogenic cooling and tool wear on surface integrity of turned Ti-6Al-4V. *Procedia CIRP* [online]. 2018, **71**, 254-259 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/j.procir.2018.05.061. ISSN 22128271. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827118306899>
- [13] HONG, Shane Y, Irel MARKUS a Woo-cheol JEONG. New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2001, **41**(15), 2245-2260 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00041-4. ISSN 08906955. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695501000414>
- [14] Machining Titanium. *Cimcool industrial Products B.V.* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.cimcool.com/wp-content/uploads/tech-reports/machining-titanium.pdf>
-

-
- [15] Heat resistant super alloys. *Sandvik Coromant* [online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/c-2920-034.pdf>
- [16] GRZESIK, W., P. NIEŚŁONY, W. HABRAT, J. SIENIAWSKI a P. LASKOWSKI. Investigation of tool wear in the turning of Inconel 718 superalloy in terms of process performance and productivity enhancement. *Tribology International* [online]. 2018, **118**, 337-346 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.10.005. ISSN 0301679X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X17304656>
- [17] XAVIOR, M. Anthony, M. MANOHAR, P. JEYAPANDIARAJAN a Patil Mahesh MADHUKAR. Tool Wear Assessment During Machining of Inconel 718. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **174**, 1000-1008 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.252. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817302527>
- [18] Obráběné materiály. *Sandvik Coromant* [online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [19] DRIML, Bohuslav. *KALENÍ A POPOUŠTĚNÍ* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
- [20] DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu II. část. 2.* vyd. Brno: VUT Brno, 1976, 265 s.
- [21] VĚCHET, Stanislav a Karel NĚMEC. *Tepelné zpracování ocelí* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2810347/>
- [22] MOLÍKOVÁ, Eva. *Nauka o materiálu – Distanční výuka* [online]. 2010 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z www: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/nomd/Index.html>.
- [23] Oceli k zušlechťování podle EN 10083-1. *Bohdan Bolzano* [online]. Kladno, 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-priruccka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1>
- [24] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [25] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno: CCB, 1995. ISBN 80-85825-10-4.
- [26] ČSN ISO 513 22 0801: *Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů s určenou řeznou hranou – Označování skupin a podskupin použití*. Praha, 2015.
- [27] NOVÁKOVÁ, E. *Obrábění kalených ocelí na CNC strojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.
- [28] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [29] Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MMspektrum* [online]. 2001, **2001**(7) [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
-

-
- [30] Nástrojové materiály. *Sandvik Coromant* [online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [31] Nástrojové třídy a břitové destičky pro soustružení ocelí. *Sandvik Coromant* [online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/turning-inserts-grades-steel/pages/default.aspx>
- [32] Nástrojové třídy a břitové destičky pro soustružení tvrzených ocelí. *Sandvik Coromant* [online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/turning-inserts-grades-hardened-steel/>
- [33] Soustružení tvrzených součástí pomocí CBN. *Sandvik Coromant* [online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/c-2940-137.pdf>
- [34] Soustružení tvrzených součástí s pomocí nové generace CBN nástrojových tříd. *Sandvik Coromant* [online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/_layouts/15/tibp/downloadshandler.ashx?url=https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-1040-225.pdf&filename=c-1040-225.pdf&view=true
- [35] Řezná keramika. *Sandvik Coromant* [online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-2929-61.pdf>
- [36] NOVÉ SOUSTRUŽNICKÉ MATERIÁLY. *M&V* [online]. Vsetín, 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://katalog.mav.cz/data/upload/files/33838-nove-materialy-rady-t8300.pdf>
- [37] PRAMET TOOLS: Nové výrobky 2018. *Dormer Pramet* [online]. 2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/Downloads/PRAMET%202018%20CZ.pdf>
- [38] MATERIÁLY VBD – SOUSTRUŽENÍ. *M&V* [online]. Vsetín, 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://katalog.mav.cz/data/upload/files/53887-1_materialy-vbd-soustruzeni.pdf
- [39] KATALOG A TECHNICKÝ PRŮVODCE: SOUSTRUŽENÍ. *SECO TOOLS* [online]. 2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/84585>
- [40] PCBN - ISO DESTIČKY PRO SOUSTRUŽENÍ. *SECO TOOLS* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://secure.secotools.com/vnext/cms-fagersta/#article/m_7126
- [41] Machining with ISCAR: PCBN - PCD - Ceramic Inserts. *ISCAR ČR* [online]. c2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.iscar.cz/Catalogs/publication-2018/CBN_2018.pdf
- [42] Complete Machining Solutions: Non-Rotating Tool Lines. *ISCAR ČR* [online]. c2017 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.iscar.cz/Catalogs/publication-2017/Non_Rotating_catalog_06_2017.pdf
- [43] NESLUŠAN, Miroslav. *Sústruženie kalených ocelí*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2009, 253 s. : il. ISBN 978-80-554-104-1.
-

- [44] Jak při soustružení dosáhnout dobré kvality součástí. *Sandvik Coromant*[online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning.aspx>
- [45] ARUN KUMAR, S., V.G. YOGANATH a Prasad KRISHNA. Machinability of Hardened Alloy Steel using Cryogenic Machining. *Materials Today: Proceedings*[online]. 2018, **5**(2), 8159-8167 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.504. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785317327748>
- [46] KUMAR, Ch Sateesh a Saroj Kumar PATEL. Effect of WEDM surface texturing on Al₂O₃/TiCN composite ceramic tools in dry cutting of hardened steel. *Ceramics International* [online]. 2018, **44**(2), 2510-2523 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.10.236. ISSN 02728842. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884217324392>
- [47] CAMARGO, José C., Dany Sanchez DOMINGUEZ, Emmanuel O. EZUGWU a Álisson R. MACHADO. Wear model in turning of hardened steel with PCBN tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2014, **47**, 61-70 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2014.06.019. ISSN 02634368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263436814001280>
- [48] BOING, Denis, Rolf Bertrand SCHROETER a Adilson José DE OLIVEIRA. Three-dimensional wear parameters and wear mechanisms in turning hardened steels with PCBN tools. *Wear* [online]. 2018, **398-399**, 69-78 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/j.wear.2017.11.017. ISSN 00431648. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004316481731325X>
- [49] BARÁNEK, Ivan. *Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie*. Trenčín: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka, 2004. ISBN 80-8075-013-0.
- [50] TICHÁ, Šárka, *Strojírenská metrologie část 1*. Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z www: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>.
- [51] OSIČKA, Karel. *Vybrané statě z obrábění – Přednášky*. Akademický rok 2018/2019
- [52] PISKA, Miroslav a Jitka METELKOVA. ON THE COMPARISON OF CONTACT AND NON-CONTACT EVALUATIONS OF A MACHINED SURFACE. *MM Science Journal*[online]. 2014, **2014**(02), 476-480 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.17973/MMSJ.2014_06_201408. ISSN 18031269. Dostupné z: <http://www.mmscience.eu/june-2014.html#201408>
- [53] DRSNL 2525M 12. *Sandvik Coromant* [online]. Sweden: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=drsnl%202525m%2012>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ARA	-	- anizotermický rozpad austenitu
BCC	-	- krychlová prostorově středěná mřížka
CBN	-	- cubic boron nitride
CNN	-	- Celostátní normy a normativy
CVD	-	- chemical vapour deposition
HB	-	- tvrdost podle Brinella
HRC	-	- tvrdost podle Rockwella
HV	-	- tvrdost podle Vickerse
IRA	-	- izotermický rozpad austenitu
KNB	-	- kubický nitrid boru
MTCVD	-	- middle temperature CVD
PCD	-	- polycrystalline diamond
PCVD	-	- plasma CVD
PD	-	- polykrystalický diamant
PKNB	-	- polykrystalický kubický nitrid boru
PVD	-	- physical vapour deposition
VBD	-	- vyměnitelná břitová destička
A_{c1}	[°C]	- překryštalizační teplota
A_{c3}	[°C]	- překryštalizační teplota
A_{cm}	[°C]	- segregační teplota
A_5	[%]	- tažnost
M_f	[°C]	- teplota martenzit finish
M_s	[°C]	- teplota martenzit start
R_a	[μ m]	- průměrná aritmetická úchylnka profilu
R_{a_t}	[μ m]	- teoretická průměrná aritmetická úchylnka profil
R_e	[MPa]	- mez kluzu
R_m	[MPa]	- mez pevnosti
R_p	[μ m]	- hodnota nejnížšího prohlubně na profilu
$R_{p0,2}$	[MPa]	- smluvní mez pevnosti
R_v	[μ m]	- hodnota největšího výstupku na profilu
R_z	[μ m]	- největší výška profilu
R_{z_t}	[μ m]	- teoretická největší výška profilu
a_p	[mm]	- šířka záběhu hlavního ostří
f	[mm]	- posuv na otáčku
i_o	[-]	- index kinetické obrobiteľnosti
l_c	[mm]	- základní délka drsnosti
l_r	[mm]	- rozsah měřené délky
l_t	[mm]	- vyhodnocovací délka
n	[min ⁻¹]	- otáčky
r_ϵ	[mm]	- poloměr špičky
v_c	[m·min ⁻¹]	- řezná rychlost
v_{c15}	[m·min ⁻¹]	- řezná rychlost při trvanlivosti T=15 min pro sledovaný materiál
v_{c15et}	[m·min ⁻¹]	- řezná rychlost při trvanlivosti T=15 min pro etalonový materiál
γ_o	[°]	- ortogonální úhel čela
K_r	[°]	- úhel nastavení hlavního ostří
K'_r	[°]	- úhel nastavení vedlejšího ostří
ϕ	[°]	- úhel střížné roviny

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Označování VBD od firmy Walter CZ s.r.o..
Příloha 2	Materiálový list chrom-molybdenové oceli 50CrMo4.
Příloha 3	Protokol měření průběhu tvrdosti povrchově kalené oceli.



Shapes of inserts

Insert style		Shape of insert									
Without	= Standard	 	 X special	 							
..MED	= Chip-Breaker for finishing										
..ROF	= Chip-Breaker for roughing										
D	= Mini-tipped double ended										
E	= Mini-tipped single ended										
HS	= Full face tipped										
L	= Full edge tipped										
S	= Solid										
T	= Triple-tipped insert, one side										
EW	= Single tipped wiper										
DW	= Double ended wiper										
Q	= Quad-tipped insert, one side										
		S-	S	N	G	N					
Tolerances						Shape of insert					
Category	Inscribed circle	d	m	s	r						
H		± 0,013	± 0,013	± 0,025	± 0,02	A					
G		± 0,025	± 0,025	± 0,130	± 0,03						
K	3,970	± 0,050		± 0,025	± 0,03	N					
	5,560	± 0,050									
	6,350	± 0,050	± 0,013								
	9,525	± 0,050									
	12,700	± 0,080									
M	15,875	± 0,010		± 0,130	± 0,05	T					
	19,050	± 0,010									
	3,970	± 0,050	± 0,050								
	5,560	± 0,050	± 0,050								
	6,350	± 0,050	± 0,050								
U	9,525	± 0,050	± 0,050	± 0,130	± 0,05	W					
	12,700	± 0,080	± 0,080								
	15,875	± 0,100	± 0,150								
	19,050	± 0,100	± 0,150								
	3,970	± 0,080	± 0,080								
	5,560	± 0,080	± 0,080	± 0,130	± 0,05	R					
	6,350	± 0,080	± 0,080								
	9,525	± 0,080	± 0,080								
	12,700	± 0,130	± 0,013								
	15,875	± 0,180	± 0,180								
19,050	± 0,180	± 0,180									



Clearance angle	Thickness	Corner radius	Grade	Angle of chamfer	Width of chamfer
<p>N </p> <p>B </p> <p>C </p> <p>P </p> <p>D </p> <p>E </p> <p>F </p>	<p>01 s = 1,59 T1 s = 1,97 02 s = 2,38 03 s = 3,18 T3 s = 3,97 04 s = 4,76 05 s = 5,56 06 s = 6,35 07 s = 7,94 09 s = 9,52</p>	<p>00 r = 0,0 01 r = 0,1 03 r = 0,3 02 r = 0,2 04 r = 0,4 08 r = 0,8 10 r = 1,0 12 r = 1,2 16 r = 1,6 24 r = 2,4 32 r = 3,2</p>	<p>BBN 61 BBN 33 BBN 62 BBN 02 BBN 09</p> <p>BDA 23 BDA 18 BDA 16</p> <p>CVD 01</p>	<p>05 = 05° 10 = 10° 15 = 15° 20 = 20° 25 = 25° 30 = 30° 35 = 35°</p>	<p>05 = 0.05 mm 1 = 0.10 mm 15 = 0.15 mm 2 = 0.20 mm 25 = 0.25 mm 3 = 0.30 mm 4 = 0.40 mm</p>

12 04 08 BBN27 S 20 20

d (mm)	Insert size								Cutting edge preparation
	R	S	T	C	D	V	W	E	
3,970		03	06	03	04	07	02	04	<p>F = </p> <p>E = </p> <p>T = </p> <p>S = </p> <p>MED = </p> <p>ROF = </p>
4,760			08	04				04	
5,000	05 .. M0								
5,560	05 .. 00	05	09	05	06		03	05	
6,000	06 .. M0								
6,350	06 .. 00	06	11	06	07	11	04	06	
7,940		07	13	08	09	13	05		
7,970								08	
8,000	08 .. M0								
9,000	09 .. M0								
9,525	09 .. 00	09	16	09	11	16	06	09	
10,000	10 .. M0								
12,000	12 .. M0								
12,700	12 .. 00	12	22	12	15	22	08		
15,875	15 .. 00	15	27	16	19		10		
16,000	16 .. M0								
19,050	19 .. M0	19	33	19					



Cutting edge preparation

CBN and PCD/CVD-D are advanced cutting materials. For the best economical result a special cutting edge preparation is required. The most important criteria for the stability and tool-life of the cutting edge is to define the right edge preparation for the CBN-grade and application combination.

Our recommendation for new work piece-materials and existing applications is PCD/CVD-D= F and CBN= S. Based on our experience it is sometimes necessary to define edge-preparation during several tests to give you the best possible solution for each application. Our technical service will assist and support you through this process whenever needed.

<p>F = Standard preparation for PCD/CVD-D Sharp cutting edge by using PCD for aluminum or other nonferrous-materials a sharp cutting edge is recommended, and in some cases also a positive cutting angle. The advantages are a reduction of cutting forces and build up.</p>	
<p>E = Honing* a honing is used to protect the cutting edge against breakage and chipping. The advantage over chamfers is especially seen in case of finishing applications with low allowances and feedrates.</p>	
<p>T = Chamfer* chamfers increase the wedge angle of the cutting edge and increase the stability of the cutting edge in hard machining applications, but the cutting forces are increased.</p>	
<p>S = Standard preparation for CBN Chamfer + honing chamfers increase the wedge angle of the cutting edge and increase the stability of the cutting edge. The cutting forces are increased by this chamfer. In the case of extreme conditions on a cutting edge a combination of a chamfer + honing (micro geometry) is established. With an increase in honing of the chamfer, the cutting edge gets a much better performance with this micro geometry, and is protected against breakage and chipping.</p>	
<p>MED = Chip-breaker for PCD*/CVD-D is used for better chip control and decreasing of the cutting forces especially in machining low silicon aluminum. MED is used in low and medium depth of cut range.</p>	
<p>ROF = Chip-breaker for PCD*/CVD-D Additional negative chamfer for better chip control and reduced cutting forces in roughing applications, minimized risk of vibrations.</p>	

*Attention:

Please contact our technical support if you want to try a different cutting-edge preparation instead our standard. Use our experience in advanced cutting materials to optimize your productivity.



Mod. 7.5.1.04 A del 04/10/92006 UNI EN ISO 9001:2000

CERTIFICATO D' ANALISI A180404/185
Test Report-Relève de contrôle- Werkszeugnis EN 10204 Type 3.1

Cliente
KSK

Ordine/Order/Commande/Bestellung Fattura/Invoice/Facture/Rechnung 193
Data/Date/Datum 14/3/19

Acciaio Steel/Acier/Stahl	Colata Heat/Coulée/Schmelze	Profilo Shape/Section/Profil	Stato di Fornitura Delivery condition/Etat de livraison/Lieferzustand
50cd4	413917	diam. 125	temprato rettificato

COMPOSIZIONE CHIMICA % - Chemicals Analysis % - Composition Chimique % - Chemische Zusammensetzung &																								
C	Mn	0,73	Si	0,24	P	0,011	S	0,004	Cr	1,03	Ni	0,16	Mo	0,17	Cu	0,17	Sn	As	Al	Ti	V	N	B	O2 ppm

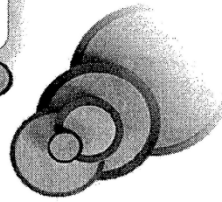
CARATTERISTICHE MECCANICHE PRIMA DELLA TEMpra									
Mechanical Properties before the hardening - Caracteristiques Mecaniques avant la phase de Tempra - Mechanische Eigenschaften vor der Härte									
Provetta	Rm	Rp	A	Z	KCU	KV	HB	Trattamento Termico - Heat Treatment - Traitement Thermique - Wärmebehandlung	
Sample	N/mm ²	N/mm ²	%	%	J	J			
Ø mm.	893	766	17	60					

Tolleranza		Errore di Forma		Rettilineità	
Tolerance/Toleranz	Roundness/Triangularite/Rundheit	Roundness/Triangularite/Rundheit	Straightness/Rectitude/Ceradheit	Straightness/Rectitude/Ceradheit	
h6	1/3 Tol.		0,1/lm		

Durezza Superficiale		Profondità di Tempra		Rugosità		Spessore Cromo	
Surface Hardness/Durete Superficiale/Oberflächiche hearte	hardness depth/profondeur de tempra/Härtetiefe	Surface finish/Rugosità/Rauheit	Surface finish/Rugosità/Rauheit	Surface finish/Rugosità/Rauheit	Rz	Spessore Cromo	Chrome thickner
		Ra	Rt	Rz		Epaisseur couche Chrome	Chromschichtstärke
		-	-	-	-		

Si attesta che il materiale della presente fornitura è conforme alla prescrizione d'ordine e ad ogni altra specifican concordata con il cliente

Certificato emesso da Ufficio Qualità HS Industries Srl



Certificato di tempra - Vickers test - Enhärtetiefe

DATA

Cliente - Client - Kund

Acciaio
Steel grade
Stahlsorte

50cd4

Colata
Heat
Schmelze

431917

Diametro
Size
Durchmesser

Ø125

Prof. Tempra
Hardening dept
Einhärtetiefe

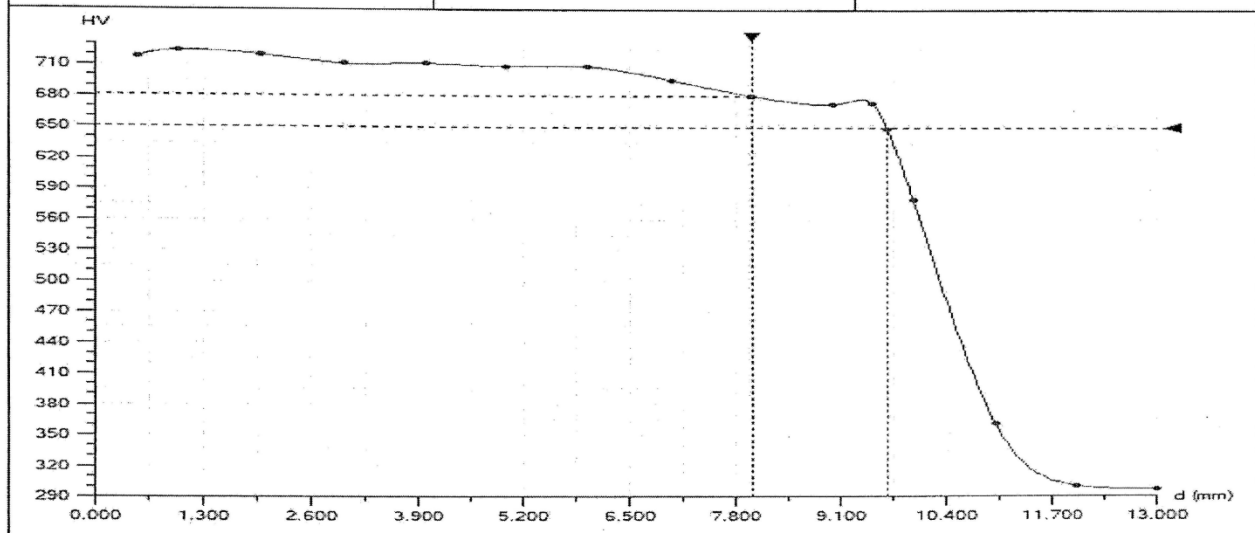
8+2/B

Valori richiesti

Durezza 650 HV
Profondità 8.000 mm
Durezza massima 0 HV
Durezza minima 0 HV

Profondità a 650 HV (mm)
N. 1 = 9.685

Durezza a 8.000 mm (HV)
N. 1 = 691



Profilo n. 1

N.	d (mm)	D1 (µm)	D2 (µm)	HV	HRC	F (gr)
1	0.500	50.5	51.2	718	60.9	1000
2	1.000	50.8	50.4	724	61.2	1000
3	2.000	50.7	50.8	720	61.0	1000
4	3.000	51.0	51.0	712	60.6	1000
5	4.000	51.0	51.0	712	60.6	1000
6	5.000	50.8	51.5	709	60.5	1000
7	6.000	51.0	51.3	709	60.5	1000
8	7.000	51.5	51.7	696	60.0	1000
9	8.000	51.9	52.4	681	59.3	1000
10	9.000	52.4	52.6	673	58.9	1000
11	9.500	52.2	52.7	674	59.0	1000
12	10.000	56.4	56.6	580	54.2	1000
13	11.000	71.4	71.9	361	37.0	1000
14	12.000	78.6	78.6	300	29.7	1000
15	13.000	79.0	79.0	297	29.2	1000

note durezza sup.60HRC