

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OBRÁBĚNÍ ROTAČNÍCH SOUČÁSTÍ Z KALENÝCH OCELÍ SE ZAMĚŘENÍM NA STAV POVRCHU

MACHINING OF ROTATING PARTS OF HARDENED STEEL FOCUSING ON
THE SURFACE CONDITION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Petr Bukovský

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Bukovský

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

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

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

Obrábění rotačních součástí z kalených ocelí se zaměřením na stav povrchu

v anglickém jazyce:

Machining of rotating parts of hardened steel focusing on the surface condition

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Charakteristika obráběných materiálů, druhy dokončovacích operací, strojní zařízení, obráběcí nástroje a jejich vlastnosti, rezní podmínky, posouzení jednotlivých druhů obrábění.

Cíle diplomové práce:

Stanovit doporučené postupy rotačního obrábění pro dokončovací operace kalených ocelí.

Seznam odborné literatury:

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

PÍŠKA, M. et al. Speciální technologie obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

SANDVIK COROMANT ; [PŘELOŽIL MIROSLAV KUDELA]. Příručka obrábění: kniha pro praktiky. 1. české vyd. Praha: Scientia, c1997, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 91-972299-4-6.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

LEE, Tae-Hong. Theoretical investigation for the hard machining : an experimental and theoretical investigation for the machining of hardened alloy steels. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2008. 224 s. ISBN 978-3-639-01017-6.

OSIČKA, K.; KALIVODA, M.; CHLADIL, J.; MOURALOVÁ, K.; OTOUPALÍK, J. Machining of hardened bearing steels. Journal Proceedings in Manufacturing Systems, 2013, roč. 8, č. 3, s. 171-176. ISSN: 2067- 9238.

OSIČKA, K.; CHLADIL, J.; KALIVODA, M.; OTOUPALÍK, J. Contribution to turning hardened steels. Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies, 2014, roč. 8, č. VI., s. 705-712. ISSN: 1314- 7269

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 11.12.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá obráběním rotačních součástí vyráběných z kalených ocelí. V úvodní kapitole je popsána problematika soustružení a broušení. Následující kapitola pojednává o tepelném zpracování a obráběných materiálech. Dále jsou uvedeny používané řezné materiály. Kritéria pro vyhodnocování kvality povrchu. A výběr řezných materiálů pro obrábění kalených ocelí od vybraných výrobců. V závěrečné kapitole je provedeno porovnání popsaných technologií.

Klíčová slova

kalená ocel, stav povrchu, řezné materiály, obrábění

ABSTRACT

The thesis deals with machining of rotating parts made from hardened steel. The introductory chapter describes the problems of turning and grinding. The next chapter deals with heat treatment and machined materials. The next lists the used cutting materials. Criteria for evaluating the quality of the surface. A selection of cutting materials for the machining of hardened steels from selected manufacturers. The final chapter is a comparison of the described technologies.

Key words

hardened steel, surface condition, cutting materials, machining

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BUKOVSKÝ, P. *Obrábění rotačních součástí z kalených ocelí se zaměřením na stav povrchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Obrábění rotačních součástí z kalených ocelí se zaměřením na stav povrchu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

29. května 2015

.....
Datum

.....
Bc. Petr Bukovský

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Obsah

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
ÚVOD.....	9
1 PROCES OBRÁBĚNÍ ROTAČNÍCH SOUČÁSTÍ.....	10
1.1 Soustružení	10
1.2 Broušení	15
2 POUŽÍVÁNÉ MATERIÁLY	21
3 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	23
3.1 Žíhání	23
3.1.1 Žíhání bez překrytalizace	24
3.1.2 Žíhání s překrytalizací	24
3.2 Kalení	25
3.3 Kalicí teplota	26
3.4 Kalicí prostředí.....	27
3.5 Způsoby kalení	28
3.5.1 Kalení martenzitické.....	28
3.5.2 Kalení bainitické	29
3.5.3 Povrchové kalení.....	30
3.5.4 Indukční povrchové kalení	30
3.5.5 Povrchové kalení plamenem.....	31
3.5.6 Laserové tepelné zpracování	31
3.6 Popouštění	32
4 MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	33
4.1 Nástrojové oceli	34
4.1.1 Nástrojové oceli nelegované	34
4.1.2 Nástrojové oceli legované	35
4.2 Rychlořezné oceli	35
4.2.1 Rychlořezné oceli vyráběné práškovou metalurgií	35
4.3 Slinuté karbidy	35
4.3.1 Nepovlakované slinuté karbidy	36
4.3.2 Povlakované slinuté karbidy.....	36
4.4 Cermety	37
4.5 Řezná keramika.....	37

4.5.1	Řezná keramika na bázi oxidu hlinitého.....	37
4.5.2	Řezná keramika na bázi nitridu křemíku	38
4.6	Supertvrdé řezné materiály.....	38
4.6.1	Polykrystalický kubický nitrid boru.....	39
4.6.2	Polykrystalický diamant.....	39
4.7	Brousicí materiály	39
4.7.1	Standartní brousicí materiály	39
4.7.2	Brousicí kotouče ze supertvrdých řezných materiálů	40
5	KRITÉRIA PRO VYHODNOCOVÁNÍ KVALITY POVRCHU	42
5.1	Parametry drsnosti	43
5.1.1	Posouzení drsnosti dle Střední aritmetické úchyly R_a	43
5.1.2	Posouzení profilu dle Maximální výšky profilu R_z	43
5.1.3	Posouzení profilu dle Celkové výšky profilu R_t	44
5.1.4	Posouzení profilu dle Maximální výšky výstupku profilu R_p	44
6	SORTIMENT ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ A VOLBA ŘEZNÝCH PODMÍNEK....	45
6.1	Soustružení	45
6.1.1	Seco Tools	45
6.1.2	Iscar	47
6.1.3	DornerPramet	48
6.2	Broušení kalených ocelí.....	49
7	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	51
	ZÁVĚR	54
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	58
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	60

ÚVOD

Cílem diplomové práce je popsat problematiku obrábění rotačních součástí vyráběných z kalených ocelí. Provést charakteristiku obráběných materiálů. Porovnat jednotlivé metody používané k obrábění kalených součástí. Porovnat sortiment jednotlivých výrobců řezných nástrojů a doporučené řezné podmínky.

Kalené oceli jsou využívány všude tam, kde je od součásti vyžadována velká odolnost proti opotřebení.

Kalené oceli kvůli jejich vysoké tvrdosti bylo možné v minulosti obrábět jen pomocí broušení. V poslední době je díky velkému rozvoji v oblasti obráběcích materiálů tato metoda dokončování spíše na ústupu. Broušení je postupně nahrazováno dokončováním za použití řezných materiálů, jako jsou například povlakované slinuté karbidy, cermety a kubický nitrid boru.

Sortiment jednotlivých výrobců řezných nástrojů je velmi obsáhlý, díky tomu je možné si vybrat nejvhodnější nástroj pro konkrétní aplikaci. U nástrojů určených pro dokončovací operace je kladen velký důraz na výslednou kvalitu a přesnost obrobenej plochy.

1 PROCES OBRÁBĚNÍ ROTAČNÍCH SOUČÁSTÍ

Obráběcí proces lze uskutečnit různými metodami obrábění. Metody obrábění lze rozdělit podle různých hledisek, např. dle charakteru práce, dělíme obráběcí operace na ruční a strojní. Podle charakteristických znaků se tyto metody obrábění dále dělí na [1,2]:

- obrábění nástroji s definovanou geometrií,
- obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií,
- nekonvenční metody obrábění,
- úpravy obrobených ploch.

1.1 Soustružení

Soustružení je obráběcí metoda, která se používá pro zhotovení součástí rotačních tvarů, při níž jsou používány jednobřité nástroje různého provedení. Soustružení je nejjednodušším způsobem obrábění a velmi frekventovanou obráběcí metodou, která je ve strojírenství používána. Soustružením lze obrábět vnitřní válcové, vnější válcové, kuželové i tvarové plochy [2].

Hlavní rotační pohyb je při soustružení vykonáván obrobkem, tento řezný pohyb je definován vztahem [3]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} [m \cdot \min^{-1}] \quad (1.1)$$

Kde: v_c [$m \cdot \min^{-1}$] - řezná rychlost,
 D [mm] - průměr obrobku,
 n [\min^{-1}] - otáčky obrobku.

Vedlejší pohyb (posuvový) je vykonáván soustružnickým nožem a je přímočarý. Posuvová rychlost je definována vztahem [3]:

$$v_f = \frac{f \cdot n}{10^3} [m \cdot \min^{-1}] \quad (1.2)$$

Kde: v_f [$m \cdot \min^{-1}$] - posuvová rychlost,
 f [mm] - posuv na otáčku,
 n [\min^{-1}] - otáčky obrobku.

Řezný pohyb je při soustružení válcové plochy realizován po šroubovici, při čelním soustružení se nástroj pohybuje po Archimedově spirále [2].

Efektivní výsledný pohyb je vektorovým součtem řezného a posuvového pohybu. Ve skalárním tvaru je definován [3]:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.3)$$

Kde: v_e [m.min⁻¹] - rychlost řezného pohybu,

v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost,

v_f [m.min⁻¹] - posuvová rychlost.

Průřez třísky je definován jako vrstva obráběného materiálu, která má být odebrána působením ostří nástroje. Adekvátně k „průřezu třísky“ lze použít pojem „plocha řezu“ nebo také „plocha průřezu třísky“ [3].

Jmenovitý průřez třísky A_D se stanoví ze vztahu [3]:

$$A_D = a_p \cdot f = b_D \cdot h_D \text{ [mm}^2] \quad (1.4)$$

Kde: A_D [mm²] - jmenovitý průřez třísky,

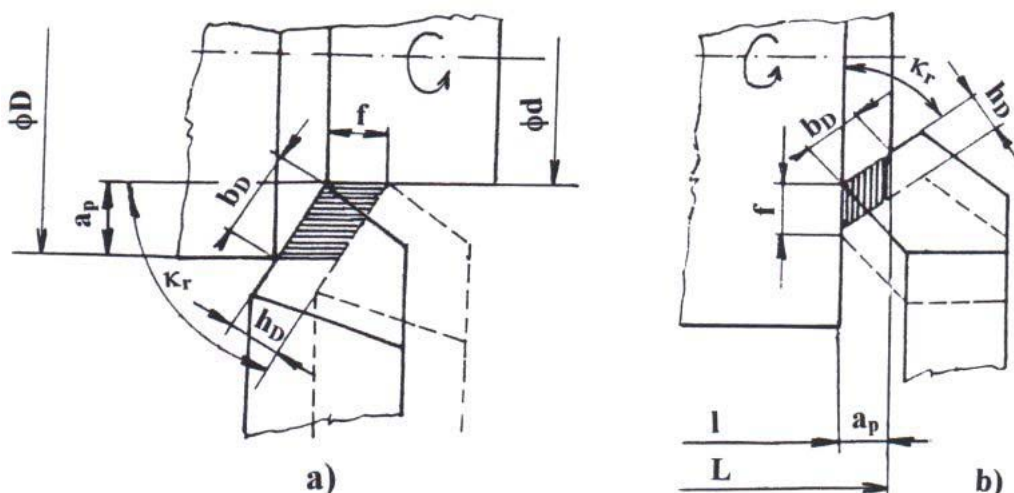
b_D [mm] - jmenovitá šířka třísky,

h_D [mm] - jmenovitá tloušťka třísky,

a_p [mm] - šířka záběru ostří,

f [mm] - posuv na otáčku.

Identifikace rozměrů průřezů třísky pro základní případy soustružení je uvedena na Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Identifikace průřezu třísky při soustružení [2].

a) válcová plocha; b) čelní plocha.

Šířka záběru ostří a_p se vyjádří ze vztahu:

- pro podélné soustružení [2]:

$$a_p = 0,5 \cdot (D - d) \text{ [mm]} \quad (1.5)$$

- pro čelní soustružení [2]:

$$a_p = L - l \text{ [mm]} \quad (1.6)$$

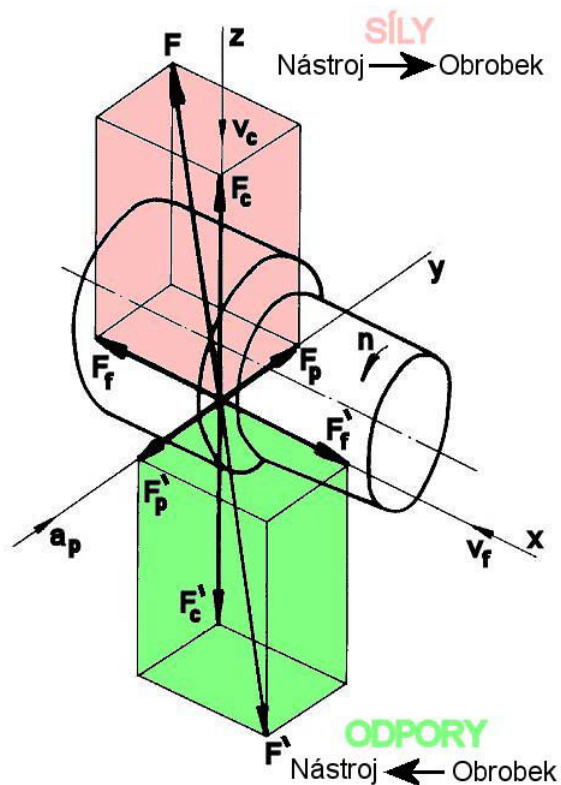
Jmenovitá šířka třísky b_D se vyjádří ze vztahu [2]:

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \text{ [mm]} \quad (1.7)$$

Jmenovitá tloušťka třísky h_D se vyjádří ze vztahu [2]:

$$h_D = f \cdot \sin \kappa_r \text{ [mm]} \quad (1.8)$$

Řezné síly



Obr. 1.2 Řezné síly a odpory při obrábění [2].

Celková řezná síla F a její složky – řezná síla F_c , posuvová síla F_f a pasivní síla F_p se pro podélné soustružení válcové plochy stanoví ze vztahů [2]:

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} [N] \quad (1.9)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} [N] \quad (1.10)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} [N] \quad (1.11)$$

kde: $C_{F_c}, C_{F_f}, C_{F_p}$ [-] - materiálové konstanty,
 $x_{F_c}, x_{F_f}, x_{F_p}$ [-] - exponenty vlivu a_p ,
 $y_{F_c}, y_{F_f}, y_{F_p}$ [-] - exponenty vlivu f ,
 a_p [mm] - šířka záběru ostří,
 f [mm] - posuv na otáčku.

Celková řezná síla se poté vypočte ze vztahu [2]:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} [N] \quad (1.12)$$

Měrná řezná síla k_c je vyjádřena řeznou silou, vztaženou na jednotku plochy řezu. Je definována jako poměr řezné síly F_c a jmenovitého průřezu třísky A_D [2]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [MPa] \quad (1.13)$$

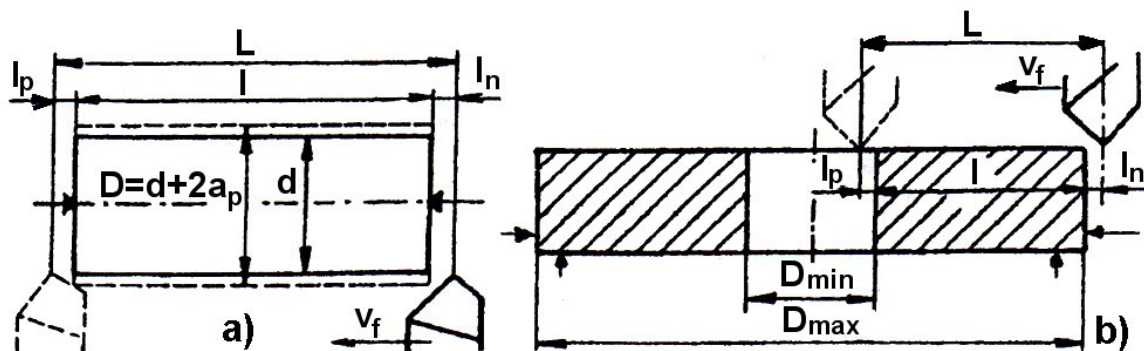
Celkový výkon obráběcího stroje, potřebný pro pokrytí řezného výkonu a pasivních odporů se spočítá ze vztahu [2]:

$$P_m = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^3 \cdot \eta} [kW] \quad (1.14)$$

Kde: F_c [N] - řezná síla,
 v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost,
 η [-] - mechanická účinnost obráběcího stroje.

Jednotkový strojní čas

Při stanovování jednotkového strojního času soustružnických obráběcích procesů se vychází z poměrů znázorněných na Obr. 1.3.



Obr. 1.3 jednotkový strojní čas [2].

a) podélné soustružení; b) čelní soustružení.

Pro podélné soustružení válcové plochy platí [2]:

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} \text{ [min]} \quad (1.15)$$

Kde: L [mm] - dráha nástroje,
 n [min^{-1}] - otáčky obrobku,
 f [mm] - posuv na otáčku.

Dráha nástroje ve směru posuvu L je dána součtem jednotlivých složek [2]:

$$L = l + l_n + l_p \text{ [mm]} \quad (1.16)$$

Kde: l [mm] - délka soustružené plochy,
 l_n [mm] - délka náběhu,
 l_p [mm] - délka přeběhu.

Pro soustružení čelních ploch se rozděljuje jednotkový strojní čas obrábění konstantní řeznou rychlostí t_{ASv} a konstantními otáčkami obrobku t_{ASn} .Hodnota t_{ASn} se určí ze vztahu (1.15).Dráhu L pro poměry na Obr. 1.3 b se vypočítají podle vztahu [2]:

$$L = \frac{[(D_{max} + 2l_n) - (D_{min} - 2l_p)]}{2} \text{ [mm]} \quad (1.17)$$

Velikost t_{ASv} pro poměry na Obr. 1.3 b stanoví ze vztahu [2]:

$$t_{ASv} = \frac{\pi \times [(D_{max} + 2l_n)^2 - (D_{min} - 2l_p)^2]}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \text{ [min]} \quad (1.18)$$

Kde: v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost,
f [mm] - posuv na otáčku.

1.2 Broušení

Broušení lze charakterizovat jako obráběcí proces, který je uskutečňován mnohobřitým nástrojem, jenž je vytvořen ze zrn brusiva, která jsou vzájemně spojena pojivem. Broušení je užíváno zejména pro obrábění součástí s vyššími požadavky na přesnost rozměrů, tvarů a kvalitu povrchu. Dále je využíváno při obrábění materiálů, které nelze jinými způsoby obrobit, nebo je broušení hospodárnější metodou. S vývojem výkonných broušících nástrojů a brusek se význam obrábění rozšiřuje z původní oblasti dokončovací operací také na produkční obrábění. Broušící proces má základní charakteristiky podobné jako jiné obráběcí procesy, zvláště je blízký frézování. Při broušení ale dochází ke kvalitativním a kvantitativním odlišnostem, které souvisí s vlastnostmi broušícího kotouče a řeznými podmínkami. Broušení se od frézování odlišuje, především různorodostí geometrického tvaru zrn a jejich nepravidelným rozmístěním po ploše broušícího nástroje. Úhel čela zrn se mění a bývá vesměs záporný. Broušící proces se uskutečňuje při vysokých řezných rychlostech (30 až 100 m.s⁻¹) a malých průřezech třísky (10⁻³ až 10⁻⁵ mm²). Od jiných obráběcích aplikací se broušící kotouče liší schopností samoostření. Tato vlastnost broušícího kotouče souvisí s poměrně málo pevným zakotvením zrn ve vazbě kotouče. V důsledku zvýšených řezných sil na otupených zrnech broušícího kotouče se tato zrna vylomí a jejich funkce je nahrazena zrny neotupenými [1,4].

Pohyby a rychlosti při broušení se identifikují pro jednotlivé broušící způsoby. V rámci zadané problematiky je dále charakterizováno obvodové vnější broušení do kulata.

Řezná rychlost v_c se vyjádří vztahem [4]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 10^3} \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (1.19)$$

Kde: v_c [m.s⁻¹] - řezná rychlost,
 d_s [mm] - průměr obráběcího kotouče,
 n_s [min⁻¹] - frekvence otáčení broušícího kotouče.

Běžná rychlost je při běžném broušení 30 až 35 m.s⁻¹. Při rychlostním broušení je nutné použít kotouč se speciálním druhem pojiva a řezná rychlost při těchto aplikacích přesahuje 80 m.s⁻¹ [4].

Obvodová rychlost obrobku v_w se vyjádří [4]:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{10^3} \text{ [m.min}^{-1}\text{]} \quad (1.20)$$

Kde: v_w [$m \cdot min^{-1}$] - obvodová rychlost obrobku,
 d_w [mm] - průměr obrobku,
 n_w [min^{-1}] - frekvence otáčení obrobku.

Stykový oblouk broušícího kotouče a obrobku se kvantifikuje jako geometrická délka styku l_g , kinetická délka styku l_k a skutečná délka styku l_e [4].

Pro běžné podmínky obvodového broušení je geometrická délka styku [4]:

$$l_g = \sqrt{2f_r \cdot r_{eq}} \text{ [mm]} \quad (1.21)$$

Kde: f_r [mm] - radiální posuv stolu brusky,
 r_{eq} [mm] - ekvivalentní poloměr broušícího kotouče.

Kinematická délka styku l_k se vyjádří [4]:

$$l_k = l_g \left(1 + \frac{1}{|q|} \right) \text{ [mm]} \quad (1.22)$$

Kde: q [-] - je poměr rychlosti.

Poloměr rychlosti se pro broušení do kulata stanoví podle vztahu [4]:

$$q = \frac{60 \cdot v_c}{w_w} \text{ [-]} \quad (1.23)$$

Ekvivalent poloměru broušícího kotouče r_{eq} vyjadřuje poloměr fiktivního broušícího kotouče v záběru s obrobkem, který má stejnou délku geometrického styku l_g jako broušící kotouč s poloměrem r_s v záběru s obrobkem o poloměru r_w při obvodovém broušení [1].

Hodnota r_{eq} se vyjádří ve tvaru [1]:

$$r_{eq} = \frac{r_w \cdot r_s}{r_w \pm r_s} \text{ [mm]} \quad (1.24)$$

Ve vztahu pro r_{eq} se pro vnější broušení do kulata použije znaménko plus a pro vnitřní broušení do kulata znaménko minus [4].

Ekvivalentní tloušťka broušení

Vzhledem k omezené platnosti a složitosti vztahů pro výpočet parametrů třísky ubírané jednotlivými zrny broušícího nástroje je pro výpočty při broušení využívána teoretická hodnota ekvivalentní tloušťky broušení h_{eq} . Při jejím odvozování se vychází z kontinuity materiálu, který na jedné straně do oblasti řezání vstupuje a na druhé straně z této oblasti vystupuje. Vrstva odebíraného materiálu o tloušťce f_r (vnější obvodové tangenciální broušení do kulata), f_a (vnější obvodové axiální broušení do kulata), nebo a_e (rovinné obvodové tangenciální broušení). Množství

vytvořených třísek pak lze teoreticky spojit v jednu plynulou vrstvu o tloušťce h_{eq} , která odchází z řezné oblasti rychlostí v_c [4].

Ekvivalentní tloušťka broušení h_{eq} se vztahuje na jednotku aktivní šířky broušícího kotouče a obecně se vyjádří [1]:

$$h_{eq} = \frac{Q_w}{b_D \cdot v_c} [mm] \quad (1.25)$$

Kde: Q_w [$mm^3 \cdot s^{-1}$] - rychlost odebrání materiálu,
 b_D [mm] - šířka aktivní části broušícího kotouče,
 v_c [$m \cdot s^{-1}$] - řezná rychlost.

Rychlost odebrání materiálu vyjádříme ze vztahu [1]:

$$Q_w = \frac{\Delta V_w}{\Delta t} [mm^3 \cdot s^{-1}] \quad (1.26)$$

Kde: ΔV_w [mm^3] - objem materiálu odebraný za časový interval.

Hodnota ekvivalentní tloušťky broušení h_{eq} se pro vnější obvodové tangenciální broušení do kulata vyjádří ze vztahu [4]:

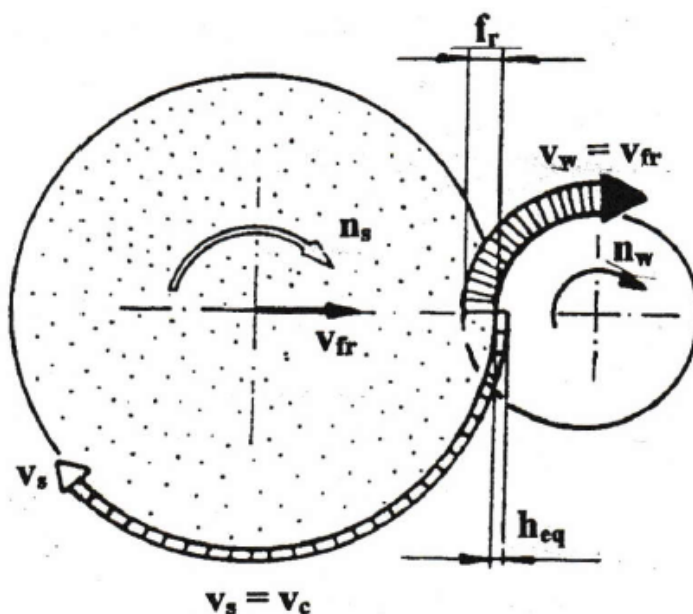
$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot f_r [mm] \quad (1.27)$$

Kde: v_c [$m \cdot s^{-1}$] - řezná rychlost,
 v_w [$m \cdot min^{-1}$] - obvodová rychlost obrobku,
 f_r [mm] - radiální posuv stolu brusky.

Pro vnější obvodové axiální broušení do kulata se vyjádří ve tvaru [4]:

$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot f_a [mm] \quad (1.28)$$

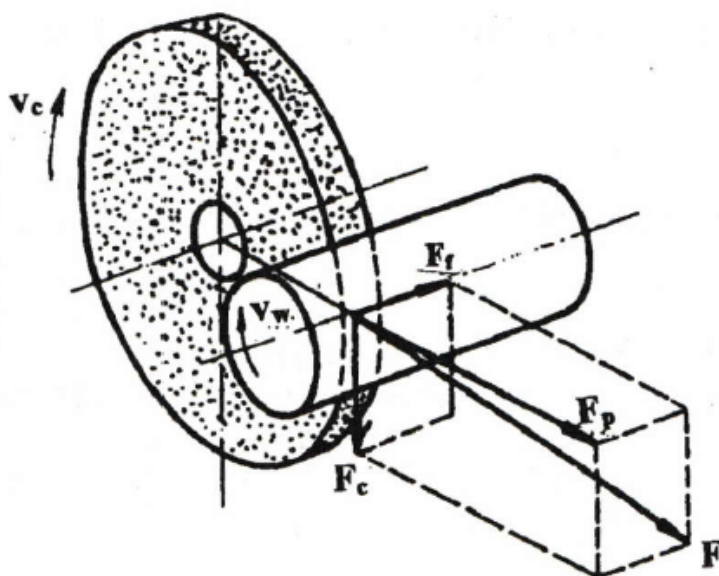
Kde: v_c [$m \cdot s^{-1}$] - řezná rychlost,
 v_w [$m \cdot min^{-1}$] - obvodová rychlost obrobku,
 f_a [mm] - axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku.



Obr. Ekvivalentní tloušťka broušení při obvodovém radiálním broušení do kulata [1].

Řezné síly

Celková řezná síla působí v obecném směru mezi broušicím kotoučem a obrobkem, rozkládá se do tří vzájemně kolmých směrů. Ve směru řezné rychlosti leží řezná síla F_c , pasivní síla F_p je kolmá k broušené ploše a posuvová síla F_f působí ve směru podélného posuvu, tzn. Kolmo na rovinu otáčení kotouče [1,4].



Obr. Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata [1].

Velikost řezných sil závisí především na způsobu broušení a průřezu třísky, dále také na zrnitosti brusiva, druhu a tvrdosti pojiva a struktuře brousícího kotouče. S otupováním brousícího kotouče může vzrůst řezná síla až několikanásobně [1].

Orientačně je možné řeznou sílu F_c určit z experimentálně získaných vztahů. Pro obvodové axiální broušení vnějších rotačních ploch se používá vztahu [4]:

$$F_c = 25 \cdot (v_w \cdot f_a)^{0,6} \cdot a_e^{0,5} [N] \quad (1.29)$$

Kde: v_w [m.min⁻¹] - obvodová rychlost obrobku,
 f_a [mm] - axiální posuv stolu na otáčku obrobku,
 a_e [mm] - pracovní záběr.

Pro obvodové axiální broušení vnitřních rotačních ploch se hodnota řezné síly F_c určí z empirického vztahu [4]:

$$F_c = 2,5 \cdot v_w^{0,5} \cdot f_a^{0,4} \cdot a_e^{0,4} \cdot d_w^{0,3} [N] \quad (1.30)$$

Kde: v_w [m.min⁻¹] - obvodová rychlost obrobku,
 f_a [mm] - axiální posuv stolu na otáčku obrobku,
 a_e [mm] - pracovní záběr,
 d_w [mm] - průměr obrobku.

Hodnotu řezné síly F_c lze také určit na základě výpočtu [4]:

$$F_c = k_c \cdot A_D [N] \quad (1.31)$$

Kde: k_c [MPa] - měrná řezná síla,
 A_D [mm²] - průřez třísky.

Měrná řezná síla nabývá hodnot: pro ocel $k_c = 10\ 000$ až $35\ 000$ MPa,
 pro litinu $k_c = 4\ 000$ až $12\ 000$ MPa,

vyšší hodnoty platí pro broušení na čisto a jemné broušení [1].

Průřez třísky A_D se vyjádří v závislosti na způsobu broušení.

Pro vnější obvodové axiální broušení do kulata platí [4]:

$$A_D = f_a \cdot h_{eq} [mm^2] \quad (1.32)$$

Kde: f_a [mm] - axiální posuv stolu na otáčku obrobku,
 h_{eq} [mm] - je ekvivalentní tloušťka broušení.

Jednotkový strojní čas

Výpočet hodnoty jednotkového strojního času závisí na způsobu broušení.

Pro vnější obvodové axiální broušení do kulata, s radiálním posuvem stolu, bez vyjiskřování, se jednotkový strojní čas stanoví podle vztahu [4]:

$$t_{AS} = \frac{l_a}{f_a \cdot n_w} \cdot \frac{p}{2 \cdot f_r} = \frac{l_a \cdot p}{2 \cdot 10^3 \cdot v_{fa} \cdot f_r} [mm^2] \quad (1.33)$$

- Kde: l_a [mm] - dráha pohybu brusky v axiálním směru $l_a = l_{na} + l_w + l_{pa}$,
 l_{na} [mm] - délka náběhu v axiálním směru,
 l_{pa} [mm] - délka přeběhu v axiálním směru $l_{pa} = l_{na} + b_s/2$,
 b_s [mm] - šířka brousicího kotouče,
 l_w [mm] - délka obrobku,
 f_a [mm] - axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku,
 n_w [mm] - frekvence otáčení obrobku,
 p [mm] - přídavek na broušení,
 f_r [mm] - radiální posuv stolu brusky na jeden axiální zdvih stolu,
 v_{fa} [m.min⁻¹] - axiální rychlost posuvu stolu brusky.

2 POUŽÍVÁNÉ MATERIÁLY

Ve strojírenském průmyslu je na celém světě používáno pro výrobu strojních součástí nejrůznějších druhů materiálů. Každý z těchto materiálů má své specifické vlastnosti, které jsou ovlivňovány složením, množstvím a druhem přísadových prvků, tepelným zpracováním, tvrdostí atd. To vše má značný vliv na volbu geometrie, třídy obráběcího nástroje a řezných podmínek [5].

Oceli k zušlechťování

Oceli v této skupině jsou převážně určeny k výrobě strojních součástí, které se tepelně zpracovávají zušlechťováním, případně jsou používány ve stavu normalizovaném. Všechny oceli musí být uklidněné, není-li dohodnuto jinak, dodávají se ve stavu tepelně nezpracovaném. Všechny oceli jsou obrobitelné ve stavu vyžíhaném na měkko. Pro lepší obrobitelnost, se doporučují oceli, u nichž je stanoveno rozmezí koncentrace síry. Chemické složení vybraných ocelí k zušlechťování je uvedeno v tabulce [6].

Oceli k zušlechťování uvedené v ČSN EN 10083-1 obsahují do 0,40 % Si. Do 0,035 % P, do 0,035 % S. Nelegované a některé legované oceli jsou vyráběny ve variantě s omezeným obsahem síry do 0,035 %, nebo s obsahem síry v rozmezí 0,020 až 0,040 % [6].

Nelegované oceli k zušlechťování mají odstupňovaný obsah uhlíku od značky C22E po značku C60E. Součet Cr + Mo + Ni je omezen hodnotou 0,63 % [6].

Chromové značky se liší obsahem uhlíku a jsou vyráběny ve dvou hladinách Cr. Značka 38Cr2 představuje ocel s nejnižším obsahem uhlíku a s nižší hladinou chromu, značka 41Cr4 představuje ocel s nejvyšším obsahem uhlíku a vyšší hladinou chromu. Chrom-molybdenové oceli obsahují vedle chromu také přísadu molybdenu. Oceli se legují mimo chromu a molybdenu také niklem, obsah niklu je od 0,90 až 1,20 % Ni [6].

Nelegované oceli se popouštějí na 550 – 660 °C, legované na 540 – 680 °C. Doporučená doba popouštění je minimálně 60 minut [6].



Obr. Typické výrobky z kalené oceli [5].

Materiály vhodné ke kalení:

č. materiálu	EN	Použití
1.3505	100Cr6	Ocel na kuličková ložiska.
1.0503	C45E	Nelegovaná ušlechtilá ocel k zušlechťování. Používá se pro výrobu méně namáhaných strojních dílů. Optimálních mechanických vlastností dosahuje v zakaleném a následně popuštěném stavu. Vhodná i pro povrchové kalení.
1.1221	C60	Nelegovaná ušlechtilá ocel k zušlechťování. Používá se pro výrobu méně namáhaných strojních dílů s vyšší pevností ve stavu zušlechtěném nebo normalizačně žíhaném s vyšší odolností proti opotřebení ve stavu kaleném.
1.7131	16MnCr5	Mangan-chromová ocel k cementování. Nejčastěji používaná cementační ocel pro středně namáhané díly.
1.6587	17CrNiMo6	Středně legovaná ušlechtilá chrom-nikl-molybdenová ocel k cementování. Ocel určena pro velmi namáhané strojní součásti s cementovaným povrchem.
1.6580	30CrNiMo8	Středně legovaná ušlechtilá chrom-nikl-molybdenová ocel k zušlechťování. Ocel se vyznačuje vysokou prokalitelností, je určena pro velmi namáhané a rozměrné strojní díly.
1.7035	41Cr4	Nízkolegovaná ušlechtilá chromová ocel k zušlechťování.

3 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Tepeelné zpracování je technologický proces, při kterém je součást vystavena jednomu nebo několika tepelným cyklům. Tento proces probíhá proto, aby se při daném složení materiálu dosáhlo požadované struktury a požadovaných vlastností. Každý z cyklů tepelného zpracování se skládá z ohřevu na danou teplotu, výdrže na této teplotě a ochlazení. Tento proces se znázorňuje graficky v souřadnicích. Na ose x se vynáší čas tepelného zpracování t [s], na ose y se vynáší teplota tepelného zpracování T [°C] [7].

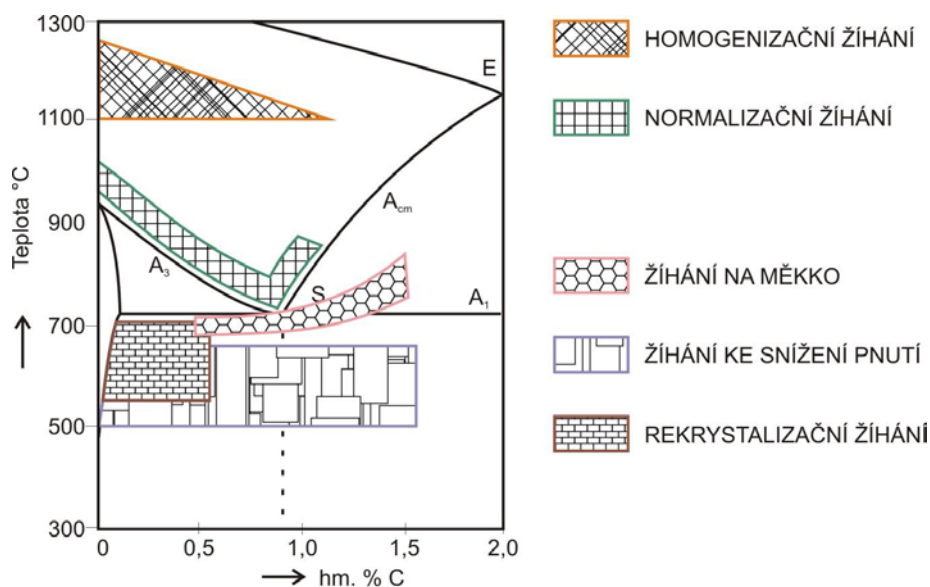
K požadované změně struktury dochází u některých druhů tepelného zpracování při výdrži na teplotě, u jiných v průběhu ochlazování [7].

3.1 Žihání

Žihání je proces tepelného zpracování, při kterém se na dílec po skončení výdrže na žihací teplotě ochlazují pomalu na klidném vzduchu nebo ve vytápěné peci. Struktura materiálu se po tomto pochodu blíží rovnovážnému stavu, takže je možné ji určit z rovnovážného diagramu [7].

Při žihání bez překrystalizace teplota žihání nepřesáhne teplotu A_{c1} , výjimku tvoří žihání na měkko u nadeutektoidních ocelí. Rozsah fázových přeměn je v tomto případě nevýznamný. Poměr feritu a cementitu se v oceli nemění. Proměnou prochází tvar a velikost zrn, koncentrace a rozdělení mřížkových poruch a velikost vnitřních pnutí [8].

Při žihání s překrystalizací dochází k úplné nebo téměř úplné přeměně výchozí feriticko-cementické struktury na austenit. Podeutektoidní oceli se žihají nad teplotu A_{c3} , nadeutektoidní nad teplotu A_{cm} nebo mezi teplotami A_{c1} a A_{cm} . Tímto postupem se dosáhne rovnoměrnější struktury a odstraní se chemická nehomogenita oceli [8].



Obr. 3.1 Schématické znázornění režimů žihání v diagramu Fe-C [8].

3.1.1 Žihání bez překrystalizace

Žihání ke snížení pnutí

Tento způsob žihání se provádí s cílem snížit pnutí v součásti, které vzniklo při předchozím tepelném zpracování jako důsledek nestejnomyšného ochlazování, místního ohřevu (svařování), tváření za studena (rovnání plechů), rozsáhlého třískového obrábění nebo nerovnoměrným ochlazováním tvarově komplikovaných a velkorozměrových dílů [8].

Teplota žihání se pohybuje v rozmezí 450 až 650 °C, výdrž na teplotě trvá několik hodin, ochlazování probíhá řízeně v peci rychlostí 50 °C za hodinu. Od 200 °C pokračuje ochlazování na vzduchu [8].

Rekrystalizační žihání

Cílem je odstranit deformační zpevnění po předchozím tváření za studena a obnovit tvárné vlastnosti oceli. Současně dochází ke změnám textury a zjemnění zrna [8].

Rekrystalizační žihání spočívá v ohřevu na rekrystalizační teplotu, u uhlíkových ocelí 550 až 750 °C, výdrži na této teplotě po dobu 1 až 5 hodin a ochlazování obvykle na vzduchu [8].

Žihání na měkko

Účelem tohoto způsobu žihání je snížení tvrdosti a zlepšení obrobitelnosti oceli. Strukturní změna probíhá sbalováním lamel lamelárního perlitu a sekundárního cementitu v těsném okolí teploty A_{c1} do globulí. Žihání na měkko se provádí převážně u eutektoidních a nadeutektoidních ocelí [8].

U nízkolegovaných konstrukčních ocelí se žihání na měkko provádí při teplotách 600 až 720 °C po dobu 4 - 8 hodin s následným postupným ochlazováním v peci. Tvoří-li výchozí strukturu lamely perlitu, vytvoří se při tomto režimu žihání hrubý globulární perlit [8].

U nadeutektoidních ocelí probíhá sbalování lamelárního perlitu obtížněji, a proto se tyto oceli žihají nad teplotou A_{c1} . Po několikahodinové výdrži na teplotě se rychlostí 10 až 15 °C za hodinu ochlazuje v peci. Od 600 °C se pak pokračuje na vzduchu. Tento způsob žihání je jediný možný pro dosažení jemného globulárního perlitu. Vysoká žihací teplota stejně jako dlouhá výdrž na teplotě způsobuje homogenizaci austenitu. Následující ochlazování proto musí být pozvolné [8].

3.1.2 Žihání s překrystalizací

Homogenizační žihání

Úkolem homogenizačního žihání je zmenšení chemické heterogenity u velkých odlitků a ingotů, které jsou polotovarem pro tváření za tepla. Homogenizační žihání se uskutečňuje při teplotě 1100 až 1200 °C po dobu desítek hodin s následným ochlazením v peci [8].

Rozdíly v chemickém složení se dorovnávají difuzí, jejíž rychlost roste se vzrůstající teplotou. Homogenizací sice dosáhneme vyrovnání chemického složení a zrovnoměrnění struktury, ale současně dlouhodobým setrváním na vysoké teplotě dochází k oduhličení a oxidaci oceli a také ke zhrubnutí austenitického zrna.

K opětovnému zjemnění zrna dojde při normalizačním žíhání nebo při tváření za tepla a následné rekystalizaci [8].

Normalizační žíhání

Normalizační žíhání se provádí za účelem zrovnoměnění struktury po předchozím zpracování a vytvoření jemnozrné struktury. Jemnozrná struktura po normalizačním žíhání vykazuje vyšší mez kluzu, mez pevnosti a zároveň dobré plastické vlastnosti [8].

Normalizační žíhání je především určeno pro uhlíkové a nízkoalloyované oceli. U podutektoidních ocelí se ohřev provádí na teplotu 30 až 50 °C nad A_{c3} , výdrží na této teplotě po dobu 1 až 4 hodiny s ochlazováním na klidném vzduchu za vzniku feriticko-perlitické struktury. U ocelí, které mají obsah uhlíku nad 0,3 % nebo u ocelí, které mají větší prokalitelnost se většinou ochlazuje z austenitizační teploty v peci, aby bylo zabráněno vzniku struktury s nadměrnou tvrdostí. Při rychlejším ochlazování vzniká lamelární perlit. Normalizační žíhání může být konečnou operací nebo se používá jako příprava pro následné kalení [8].

Izotermické žíhání

Izotermické žíhání se provádí za cílem zajistit rovnoměrnou strukturu se specifikovanou jemností perlitu. Proces tepelného zpracování je následující. Ohřev na teplotu 20 až 40 °C nad A_{c3} popř. pod A_{cm} . Následuje rychlé ochlazení pod teplotu blízko A_1 a izotermická výdrž na teplotě (600 až 700 °C) po dobu přeměny austenitu na perlit. Další ochlazování na teplotu okolí probíhá na vzduchu [8].

3.2 Kalení

Kalením se označují ty způsoby tepelného zpracování, jejichž cílem je dosáhnout nerovnovážných stavů ocelí. Podle převažující strukturní složky se kalení rozděluje na martenzitické a bainitické. Ve většině případů je cílem kalení zajistit strukturu martenzitickou [6].

Kalitelnost, zakalitelnost a prokalitelnost

Při dostatečné rychlosti ochlazování z austenitické teploty, kterou se ne vždy podaří realizovat u reálných součástí vyrobených zejména z nízkouhlíkových ocelí, lze u převážné většiny ocelí získat martenzitickou strukturu. Schopnost oceli dosáhnout tohoto strukturního stavu se nazývá *kalitelnost* a odpovídající oceli označujeme jako kalitelné. Mezi nekalitelné oceli se řadí především vysokolegované nepolymorfni oceli s feritickou nebo austenitickou strukturou. S pojmem kalitelnost souvisí také dva další pojmy a to *zakalitelnost* a *prokalitelnost* [6].

Zakalitelnost se zpravidla hodnotí tvrdostí oceli po zakalení a její maximální dosažená hodnota závisí na tvrdosti martenzitu, která závisí především na obsahu uhlíku v austenitu. Zakalitelnost lze určit na jakémkoli vzorku, který byl ochlazován nadkritickou teplotou. Kalitelnost a zakalitelnost jsou materiálové charakteristiky a mimo chemické složení oceli jsou závislé na stavu austenitu před kalením (velikost zrna, homogenita, přítomnost minoritních fází) [6].

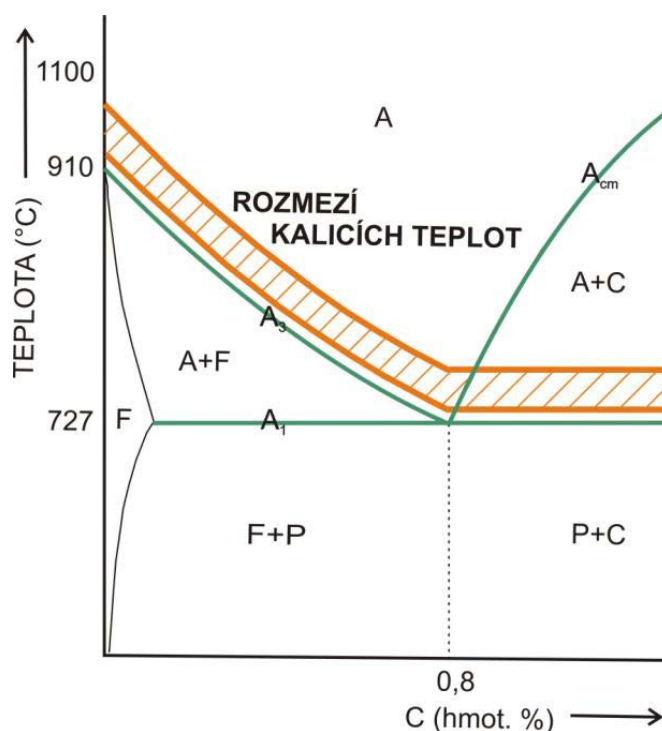
Jako *prokalitelnost* je označována schopnost oceli získat po zakalení tvrdost odpovídající její zakalitelnosti v určité hloubce pod povrchem kaleného předmětu.

Hodnota prokalitelnosti je dána vztahem mezi kritickou rychlostí kalení a skutečnou rychlostí ochlazování uvažovaného předmětu, která se zvětšuje s rostoucí intenzitou odvodu tepla použitým kalicím prostředím, se zvětšujícím se poměrem povrchu k objemu kalené součásti a se zvětšující se tepelnou vodivostí oceli [6].

3.3 Kalicí teplota

Teplota kalení padeutektoidních ocelí se pohybuje 30 až 50 °C nad teplotami A_{c3} . Takto zvolená teplota odpovídá kompromisu mezi požadavkem dosažení homogenního austenitu v co nejkratším čase a zachování jemného austenitického zrna [6].

U jemnozrnných ocelí lze použít vyšší teplotu austenitizace bez nebezpečí zhrubnutí původního austenitického zrna. Hrubé původní austenitické zrna má za následek hrubou strukturu martenzitu po zakalení, četnější výskyt kalicích mikrotrhlin a vzrůst úrovně vnitřního pnutí. Tyto změny stavu původní struktury se projeví především poklesem houževnatosti, růstem tranzitní teploty a větší pravděpodobností vzniku předčasných a zbrzděných lomů. Kalením z teploty mezi A_{c3} a A_{c1} (rovnováha austenitu a feritu) se získá heterogenní struktura tvořená martenzitem a feritem s nižší tvrdostí a s větším vnitřním pnutím, která jsou nežádoucí [6].



Obr. 3.2 Pásmo kalicích teplot v diagramu Fe-Fe₃C [8].

Optimální kalicí teplota nadeutektoidních ocelí nabývá hodnot 30 až 50 °C nad A_{c1} . Struktura správně zakalené nadeutektoidní oceli je tvořena martenzitem s jistým podílem zbytkového austenitu a nerozpuštěného sekundárního cementitu. Optimální konečné vlastnosti zaručuje rovnoměrně rozložený sekundární cementit, který lze získat žíháním na měkko zařazeným před kalením. Při použití kalicí teploty

nad A_{cm} se sekundární cementit rozpustí, zhrubne austenitické zrno, zvýší se koncentrace uhlíku v austenitu, což má po zakalení za následek větší obsah uhlíku v martenzitu (větší strukturní pnutí, častější výskyt mikrotrhlin) a jeho zhrubnutí spolu se zvětšeným podílem zbytkového austenitu. Výsledná struktura je měkčí, křehčí a méně teplotně stabilní. Tato struktura je tedy považována za nežádoucí [6].

3.4 Kalicí prostředí

Cílem kalení je martenzitická struktura v předem stanovené části průřezu, ve které rychlost ochlazování musí být větší než rychlost kritická. Za optimální ochlazovací prostředí lze považovat takové, které umožní ochlazování příslušných objemů rychlostí jen o málo vyšší jak rychlost kritická, nadměrná rychlost ochlazování by vedla ke zvýšené úrovni vnitřních teplotních a strukturních pnutí. Optimální ochlazovací prostředí by mělo mít ochlazovací účinnost velkou v oblasti perlitické přeměny a naopak relativně malou v oblasti martenzitické, příliš pomalá rychlost ochlazování pod M_s by mohla mít za následek stabilizaci zbytkového austenitu [6].

Ochlazovací účinnost je především závislá na tepelné vodivosti, měrném a výparném teple a na viskozitě kalicího prostředí. Pokud se prostředí při kalení odpařuje, je nutné tvořící se parní polštář porušit relativním pohybem předmětů a prostředí. Účinnost kalicího prostředí je také ovlivněna velikostí měrného povrchu předmětu a jeho čistotou [6].

Voda je nenáročná, nehořlavá, levná a nejběžnější intenzivně kalicí prostředí. Největší ochlazovací účinek má voda v oblasti nosu diagramu ARA, je tedy možné zakalit i předměty z uhlíkových ocelí. Velká ochlazovací rychlost v oblasti martenzitické přeměny je však nežádoucí, protože zvyšuje úroveň vnitřních pnutí. S rostoucí teplotou vody prudce klesá ochlazovací účinek v perlitické oblasti, ale jen nepatrně se mění v oblasti martenzitické, proto zvyšování teploty vodní lázně není žádoucí. Ochlazovací účinek vody lze zvýšit jejím pohybem, přísadou kyseliny (H_2SO_4), solí ($NaCl$, $NaNO_3$ a KNO_3) nebo louhu ($NaOH$). Značné možnosti v oblasti regulace ochlazovacího účinku vody, tak jeho závislosti na teplotě kaleného předmětu, dávají přísady ve vodě rozpustných polymerů. Přísady polymerů zpomalují velice rychlý a nerovnoměrný ochlazovací účinek vody, což vede k odstranění defektů, jako jsou měkká místa, deformace a trhliny v kalených předmětech. Vodné roztoky polymerů je však nutné chránit před znečištěním a napadením bakteriemi [6].

Oleje mají v porovnání s vodou 3 až 4x menší rychlost ochlazování v oblasti perlitické a až 10x menší v oblasti martenzitické. Ochlazovací účinky oleje se na rozdíl od vody, se vzrůstající teplotou příliš nemění. Olej se používá jako kalicí médium hlavně pro legované oceli. Výhodou jsou malá vnitřní pnutí, nevýhody pak spočívají v nebezpečí vznícení a v negativním vlivu na životní prostředí. Nejvíce používanými jsou minerální oleje s přísadou aditiv, v menším rozsahu jsou využívány syntetické oleje na bázi polyalkylenglykonů a esterů. Výhoda syntetických olejů v porovnání s minerálními spočívá v jejich delší životnosti, ve splnění náročnějších kritérií bezpečnosti a ochrany zdraví při práci, včetně menšího zatížení životního prostředí [6].

Vzduch je nejmírnější kalicí prostředí. Ochlazování na vzduchu je plynulé, rychlost ochlazování lze zvýšit prouděním, případně kombinací vzduchu a vodní mlhy. Na vzduchu se kalí vysoce legované tzv. samokalitelné oceli [6].

Intenzita ochlazování je hlavním kritériem hodnocení kalicích prostředí, stále více se uplatňují i hlediska fyziologické nezávadnosti, ekologické neškodnosti, snadné omyvatelnosti, odolnosti proti tepelnému zatížení, oxidaci a stárnutí [6].

Tab. 3.1 Rychlost ochlazování oceli v různých kalicích prostředích [9].

Kalicí prostředí	Rychlost ochlazování [°C/s] v rozmezí teplot	
	650-550 °C	350-250 °C
Voda, 18 °C	600	270
Voda, 50 °C	100	270
10% NaCl, 18 °C	1100	300
10% NaOH, 18 °C	1200	300
Minerální olej	125	25
Vzduch	5	1

Z tabulky je zřejmé, že nejintenzivnějším ochlazovacím prostředím je voda a některé vodné roztoky solí. Nevýhodou těchto ochlazovacích prostředí je vysoká ochlazovací rychlost v průběhu martenzitické transformace, čímž dochází ke vzniku velkého vnitřního pnutí. Proto se jako výhodnější ochlazovací prostředí jeví olejové lázně [9].

3.5 Způsoby kalení

Volba způsobu kalení je závislá na požadovaných vlastnostech kaleného předmětu, jeho velikosti a druhu použité oceli. Při plynulém ochlazování jsou předměty kaleny v prostředí o pokojové teplotě. Při přetržitém ochlazování se používá dvou prostředí o pokojové teplotě, ale s rozdílnou ochlazovací intenzitou, nebo teplé lázně. Cílem různých variant přetržitého ochlazování je snížit úroveň vnitřních pnutí a tím omezit deformace kaleného předmětu, případně zabránit vzniku kalicích trhlin.

3.5.1 Kalení martenzitické

Při tomto způsobu kalení je dílec ochlazován tak rychle, aby ochlazovací křivky povrchu i středu minuly křivky počátečního difuzního rozpadu austenitu.

Martenzitické kalení dělíme na:

I. Nepřetržité

Teplota kaleného dílce klesá plynule až na teplotu M_s , kdy začne přeměna austenitu na martenzit. Tento způsob kalení je provozně nejjednodušší, v materiálu však vznikají největší deformace a pnutí.

II. Přetržité

Dílec je ochlazován rychlostí, při které minou ochlazovací křivky povrchu a středu křivku anizotermického rozpadu austenitu. Poté se ochlazování zpomalí.

a. Lomené kalení

Součást je nejprve ochlazována nadkritickou rychlostí. Poté co ochlazovací křivka mine křivku diagramu ARA, se ochlazování zpomalí. Teplota však nadále plynule

klesá. Prakticky se tento způsob kalení provádí tak, že se nejprve ochlazuje v prostředí, které má velký ochlazovací účinek (např. vodě) a poté se přejde do prostředí s menším ochlazovacím účinkem. Pro úspěšné zakalení součásti je nutné znát ARA diagram zpracovávaného materiálu a přesně dodržovat technologický postup.[7]

Zpravidla se používají tyto kombinace ochlazovacích prostředí: voda-olej, voda-vzduch nebo olej-vzduch. Lomené kalení vede ke snížení strukturních pnutí a využívá se zejména pro tvarově složitě součásti a rozměrné obrobky, které vzhledem k velkým rozměrům vyžadují velkou intenzitu ochlazování v oblasti perlitické přeměny a které často praskají při kalení do studené lázně [6].

b. Termální kalení

Při termálním kalení se předmět ochlazuje nadkritickou rychlostí v lázni, jejíž teplota obvykle leží těsně nad teplotou M_s kalené oceli. Dostatečná prodleva na této teplotě slouží k vyrovnání teploty mezi povrchem a středem kaleného předmětu a vede ke snížení pnutí. Po vyrovnání teploty pokračuje ochlazování tak, aby ochlazovací křivka prořala čaru M_s . Prodleva by neměla přesáhnout inkubační prodlevu do vzniku bainitu, poté následuje ochlazení, které probíhá zpravidla na vzduchu, při kterém proběhne martenzitická přeměna. Termální kalení je vhodné zejména pro výrobky zhotovené z legovaných ocelí s dostatečnou stabilitou austenitu nad teplotou M_s , nebo u menších tenkostěnných a tvarově složitých výrobků z uhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí [6,7].

c. Kalení se zmrazováním

Kalení se zmrazováním je postupem, kdy je zakalený předmět přesunut v co nejkratším čase do prostředí s teplotou pod bodem mrazu (teplota kapalného dusíku -196 °C). Používá se u ocelí s vysokým obsahem uhlíku a u ocelí, které obsahují prvky stabilizující austenit, u těchto ocelí zůstává po zakalení ve struktuře vysoké procento zbytkového austenitu. Jeho cílem je tedy také dosažení menšího podílu zbytkového austenitu ve struktuře. Tohoto postupu je využíváno u výrobků, které pracují za nízkých teplot, při kterých by mohlo dojít k transformaci zbytkového austenitu na martenzit a také u všech dílců, u nichž je vyžadována rozměrová stabilita a které se vyrábějí z ocelí s teplotou M_f pod bodem mrazu [6,7].

3.5.2 Kalení bainitické

Při bainitickém kalení se transformuje austenit na bainit buď v průběhu plynulého ochlazování tj. při poklesu teploty nebo izotermicky tj. při konstantní teplotě [6].

I. Nepřetržité bainitické kalení

Tento způsob kalení je méně častý. Po ochlazení vznikne ve struktuře směs bainitu a martenzitu, která musí být popuštěna, aby byl odstraněn martenzit [6].

II. Přetržité bainitické kalení (izotermické)

Při tomto způsobu kalení probíhá izotermická transformace na bainit. Po skončení překrytality je ve struktuře bainit a menší množství zbytkového austenitu. Dílce se nepopouštějí, protože popuštěný bainit má horší vlastnosti [6].

3.5.3 Povrchové kalení

Jedná se o zvláštní technologický postup martenzitického kalení. Zakalí se pouze povrch součásti, zatímco střed si zachová svou původní strukturu. Vysoká tvrdost povrchu při zachování houževnatosti jádra je požadována u součástí, které mají mít velkou odolnost proti opotřebení, zvýšenou odolnost vůči dynamickému namáhání a zvýšenou mez únavy [7].

Povrchové kalení se skládá z rychlého ohřevu povrchové vrstvy součásti na kalicí teplotu a následného zakalení. Ohřev musí být dostatečně intenzivní, rychlost ohřevu musí být tedy dostatečně velká a doba ohřevu krátká, což vede k vytvoření a zachování teplotního rozdílu mezi povrchovou vrstvou a jádrem součásti [6,7].

Mechanismus fázových přeměn se ani při vysokých teplotách ohřevu zásadně nemění. Vznik austenitu, rozpouštění perlitického cementitu jsou difuzní děje. Se zvyšující se rychlostí ohřevu vzrůstá teplota přeměny perlitu na austenit, tato přeměna probíhá v intervalu teplot, který se zvětšuje s rostoucí rychlostí ohřevu. Tím se zvyšuje i teplota ukončení přeměny. Pro vytvoření austenitu s vyhovující chemickou homogenitou v podmínkách rychlého plynulého ohřevu je nutné použít teploty o 200 °C vyšší než při běžném objemovém kalení. Spolu s rostoucí rychlostí ohřevu roste také rychlost nukleace zárodků austenitu. Povrchové kalení vede ke zjemnění austenitického zrna a tím i ke zjemnění výsledné martenzitické struktury. Zjemnění vede k vyšší tvrdosti i houževnatosti martenzitu v povrchové vrstvě, opět ve srovnání s objemovým kalením [6].

Pro povrchové kalení se zpravidla používají podeutektoidní uhlíkové oceli s obsahem uhlíku nad 0,35 hm. %. Většinou se povrchové kalení používá u normalizovaných součástí, při zvýšených požadavcích na pevnost a houževnatost jádra se součásti před povrchovým kalením zušlechťují [6].

Ohřev povrchové vrstvy na kalicí teplotu se provádí zpravidla plamenem, indukovanými proudy nebo laserem.

Jako kalicí prostředí se u povrchového kalení obvykle používá voda, pro uhlíkové oceli olej, pro nízkolegované oceli nebo při ohřevu laserem se kalí ochlazením na vzduchu [6].

3.5.4 Indukční povrchové kalení

Povrchová vrstva předmětu je ohřívána indukovanými proudy střední (1 kHz až 1,5 kHz) nebo vysoké (150 kHz až 2 MHz) frekvence pomocí induktoru, který je tvořen cívkou nebo smyčkou do kterého se dílec vkládá. Střídavý proud procházející induktorem indukuje ve vloženém, elektricky vodivém předmětu magnetické pole a vznikají vířivé proudy. Tloušťka ohřáté vrstvy je nepřímo úměrná frekvenci proudu, dále závisí na rychlosti a době ohřevu. Tloušťka zakalené vrstvy se obvykle pohybuje v rozmezí 1 až 6 mm [6,7].

U tohoto způsobu kalení rozlišujeme kalení jednorázové, kdy se nejprve ohřeje celý povrch, který má být zakalen na kalicí teplotu, a poté je ochlazen vodní sprchou nebo ponořením do lázně. Při kalení postupném je těsně za induktorem umístěna sprcha, na kalicí teplotu je tedy vždy zahřáta jen část povrchu, která se ihned ochladí sprchou [6].

Indukční kalení je vhodné pro menší plochy a velké série výrobků. Investiční náklady na zavedení tohoto způsobu kalení jsou relativně vysoké. Proces indukčního kalení lze snadno automatizovat a zařadit do výrobní linky [6].

3.5.5 Povrchové kalení plamenem

Zdrojem tepla je plamen, ve kterém je spalován vhodný plyn, obvykle propan, metan nebo acetylen, spolu s kyslíkem. Nejmenší tloušťka zakalené vrstvy je asi 3 mm pro jednorázové kalení a asi 1,5 mm pro postupné kalení [6].

Ve srovnání s indukčním ohřevem je rychlost ohřevu dosahovaná při ohřevu plamenem menší, tloušťka zakalené vrstvy je tedy větší a rovnoměrnost zakalené struktury horší. Pořizovací náklady na povrchové kalení plamenem jsou menší [6].

Povrchové kalení plamenem nebo indukčním ohřevem je využíváno především pro dynamicky namáhané součásti, jejichž povrch musí mít velkou odolnost proti opotřebení, vysokou tvrdost a únosnost povrchové vrstvy, a dostatečně houževnaté jádro. Povrchové kalení se aplikuje na ozubená kola, čepy, kladky [6].

3.5.6 Laserové tepelné zpracování

Laserovým zářením lze koncentrovat výkonovou hustotu a dodat tak povrchu rychle a bezkontaktně velké množství energie, s tím také souvisí rychlost ohřevu a ochlazování, která se pohybuje v rozmezí 10^4 až 10^6 °C/s [6].

Vzhledem k velkým rychlostem ohřevu a ochlazování dochází k rychlým změnám napětí, mění se teplota kinematika fázových přeměn a následně i výsledná mikrostruktura. U ocelí se předpokládá i možnost bezdifuzní přeměny feritu na bezuhlíkový martenzit [6].

Doba působení a hustota energie dopadajícího svazku jsou určujícími faktory pro velikost oblasti tepelného ovlivnění a tvar zpevněné zóny. Hloubka transformované vrstvy se podle podmínek ozáření a druhu materiálu pohybuje v rozmezí od 0,2 do 0,8 mm, stopa dosahuje šířky 5 mm. Při zpracování větších ploch je třeba kladení laserových stop vedle sebe nebo jejich křížení, přičemž dochází k vzájemnému ovlivnění jednotlivých stop [6].

Metody zpevnění povrchových vrstev po ozáření laserovým paprskem lze rozdělit do těchto skupin [6]:

- a) Povrchové kalení, při němž teplota ani lokálně nepřesáhne bod tavení, po tomto způsobu kalení následuje samovolné ochlazení povrchové vrstvy. Jemnozrnná struktura o vysoké tvrdosti zasahuje do hloubky několika desetin milimetru a deformace povrchu je zanedbatelná. V případě ocelí může být zpevňující efekt vyvolán i martenzitickou přeměnou.
- b) Lokální natavení povrchu ve stopě paprsku, které umožní rozpuštění fází ve zpracovaném materiálu běžně nerozpuštěné, a tím dosáhnout značného přesycení povrchové vrstvy legujícími prvky. Po ochlazení zůstává přesycený tuhý roztok a velmi jemná struktura s vynikající odolností proti opotřebení.
- c) Nalegování povrchu, při kterém dochází k lokální změně chemického složení v důsledku přímého legování nebo plátování.

Hlavní předností zpracování laserem patří možnost lokalizace do libovolného místa povrchu materiálu, minimální deformace a vnitřní pnutí, dobrá soudržnost mezi zpevněnou vrstvou a základním materiálem. Hlavní nevýhoda tohoto způsobu zpracování je ve vysokých pořizovacích a provozních nákladech [6].

Laserová technologie nalezne své uplatnění v široké škále aplikací, je použitelná na všechny běžně kalitelné oceli, nízkouhlíkové oceli s obsahem 0,20 hm. % C a také pro všechny druhy litin [6].

3.6 Popouštění

Popouštění je ohřev zakalené oceli na teplotu pod A_{c1} , výdrži na této teplotě minimálně 1 hodinu a následného ochlazení vhodnou rychlostí. Popouštění následuje ihned po kalení z důvodu nebezpečí vzniku lomů v důsledku vnitřního pnutí. Účelem popouštění je snížení vnitřního pnutí ve struktuře a zvýšení houževnatosti struktury [8].

Z technologického hlediska rozdělujeme popouštění na [8]:

- nízkoteplotní,
- vysokoteplotní.

Nízkoteplotní popouštění

Realizuje se při teplotách 100 až 300 °C, u nástrojových vysocelegovaných ocelí až při teplotě 600 °C. Cílem nízkoteplotního popouštění je snížit hladinu vnitřního pnutí, zmenšit obsah zbytkového austenitu, popřípadě stabilizovat rozměry součásti při zachování vysoké tvrdosti. U uhlíkových a nízkolegovaných ocelí se do teploty popouštění 160 °C tvrdost zakalených ocelí nezmenšuje, při popouštění nad 200 °C dochází k poklesu tvrdosti [8].

Vysokoteplotní popouštění

Probíhá při teplotách 400 až 650 °C. Cílem tohoto způsobu popouštění je dosáhnout optimální kombinace pevnostních vlastností, houževnatosti a plasticity. Kalení na martenzit a následující vysokoteplotní popouštění se označuje jako zušlechťování. Výsledná struktura zajišťuje výhodnou kombinaci pevnostních a tvárných vlastností. Je tvořena feritem a globulárními karbidy. Požadované vlastnosti lze regulovat teplotou popouštění. Čím vyšší je teplota popouštění, tím lepší jsou tvárné vlastnosti a snižuje se pevnost [8].

4 MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Volba vhodného materiálu a třídy obráběcího nástroje je důležitým faktorem, který je třeba zohlednit již při samotném návrhu obráběcí operace. Proto je důležitá elementární znalost každého nástrojového materiálu a jeho funkčních vlastností, aby bylo možné provést správnou volbu pro všechny aplikace. Mezi další hlediska, která je nutné uvážit při návrhu operace je materiál obrobku, typ a tvar obráběné součásti, podmínky obrábění a požadovaný stupeň kvality obrobené plochy [5].

Průběh a výstupy řezného procesu jsou významně závislé na vlastnostech řezné části nástroje, jenž je zhotovena z příslušného řezného materiálu. Produktivita je závislá na druhu řezného materiálu. Důsledkem velkého rozvoje v této oblasti je v dnešní době k dispozici rozsáhlý sortiment materiálů vhodných pro výrobu řezných nástrojů, od nástrojových ocelí až po syntetický diamant. Každý z řezných materiálů je vhodný pro určitou aplikaci, žádný z dnes používaných nástrojových materiálů není universální. V současné době, ani v blízké budoucnosti nelze očekávat objevení zcela nového druhu řezného materiálu, proto je úsilí všech výrobců nástrojových materiálů stejné, všichni směřují své úsilí spíše na specializaci a vymezení použitelnosti pro dnes již známé a používané nástrojové materiály [1,3,10].

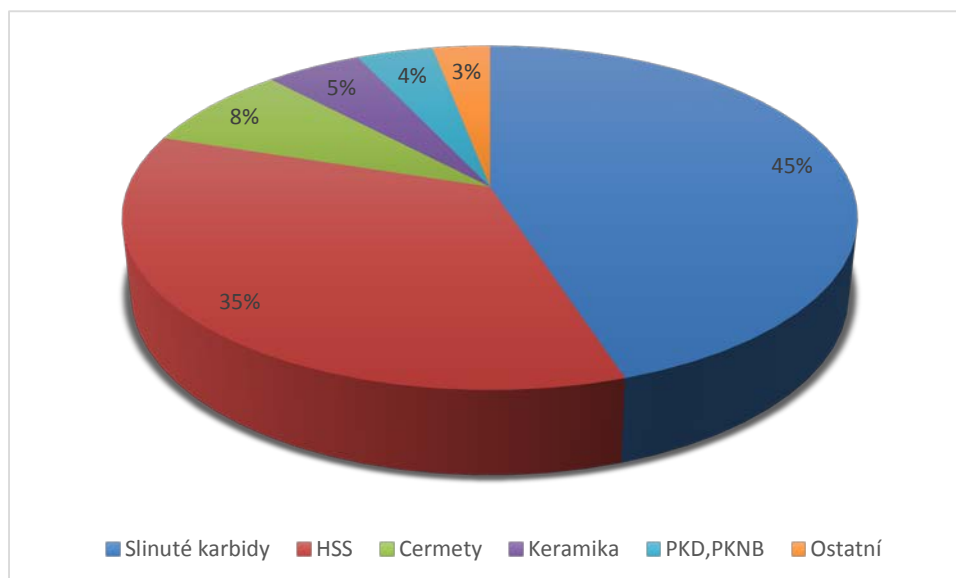
Rozsah použitelnosti nástrojových materiálů je vymezen jejich fyzikálními, chemickými, tepelnými a mechanickými vlastnostmi. Nástrojové materiály s velkou tvrdostí jsou používány pro obrábění při vyšších rychlostech s malým průřezem odebírané třísky, u těchto způsobů obrábění převládá tepelné zatížení nad mechanickým, materiály s vysokou houževnatostí se využívají při vyšších posuvových rychlostech, kde v důsledku většího průřezu třísky převládá mechanické zatížení [10].

Mezi požadavky, které jsou kladeny na nástrojové materiály, patří tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu a houževnatost. Všechny z uvedených vlastností by měl nástrojový materiál splňovat při vyšších i vysokých teplotách po dostatečně dlouhou dobu [3].

Výběr vhodného nástrojového materiálu závisí zejména na:

- Rozměrech obrobku, jeho tvaru, druhu obráběného materiálu a sériovosti výroby.
- Technologii výroby polotovaru, stavu povrchové kůry, druhu vměstků, jejich distribuci.
- Tvaru a druhu řezu – řez plynulý nebo přerušovaný, podmínkách chlazení a mazání.
- Obráběcím stroji – druhu, fyzickém stavu, jeho ekonomické provozní nákladnosti.
- Finanční náročnosti řezného materiálu, nákladům na jeho provoz a údržbu.
- Odolnosti proti opotřebení – fyzikálnímu i chemickému, zvláště zatížení za tepla.
- Požadavcích na kvalitu obrobeného povrchu.

- Požadavcích na spolehlivost, bezpečnost a ekologii obráběcího procesu.
- Možnosti recyklace nebo bezpečné likvidace opotřebeného nástroje.



Obr. 4.1 Světová produkce řezných materiálů [11].

4.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli jsou zařazeny ve třídě 19 a jejich rozdělení je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 4.1 Rozdělení a označování nástrojových ocelí [1].

Základní číselná značka	Význam třetí číslice v základní značce oceli	
19 0xx 19 1xx 19 2xx	Dvojcísle ze 3. a 4. číslice vyjadřuje střední obsah uhlíku	Nástrojové oceli nelegované
19 3xx	Oceli manganové křemíkové, vanadové	Nástrojové oceli legované
19 4xx	Oceli chromové	
19 5xx	Oceli chrommolybdenové	
19 6xx	Oceli niklové	
19 7xx	Oceli wolframové	
19 8xx	Oceli rychlořezné	
19 9xx	Volné	

4.1.1 Nástrojové oceli nelegované

Na vlastnosti těchto ocelí má největší vliv obsah uhlíku. Tvrdost oceli v zakaleném stavu roste spolu se vzrůstajícím množstvím uhlíku. Nástroje z nelegovaných ocelí snášejí teplotu bříty do 220 °C, je možné s nimi obrábět řeznými rychlostmi do 15 m.min⁻¹. V dnešní době jsou již nahrazovány legovanými nástrojovými oceli [1].

4.1.2 Nástrojové oceli legované

Hlavními legujícími prvky v těchto ocelích jsou karbidotvorné prvky Cr, V, W, Mo, které vytvářejí tvrdé a při vysokých teplotách stálé karbidy. Dalšími legujícími prvky jsou Ni, Si a Co ale ty nejsou karbidotvorné [1].

Legované nástrojové oceli se používají pro výrobu téměř všech druhů řezacích, stříhacích a tvářecích nástrojů. Oproti nelegovaným ocelím jsou charakterizovány lepší prokalitelností a zvýšenou odolností proti popuštění, jsou ale také náročnější na tepelné zpracování [1].

Nástroje z legovaných nástrojových ocelí jsou použitelné v rozmezí teplot 250 až 350 °C a pro řezné rychlosti v rozsahu 15 až 25 m.min⁻¹ [1].

4.2 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli jsou pro své zcela specifické vlastnosti a využitelnost uváděny jako samostatná skupina legovaných ocelí pro vysocevýkonné řezné nástroje. Obsahují karbidotvorné prvky W, Cr, V, Mo a nekarbidotvorný Co. Obsah uhlíku je v těchto ocelích menší jak 1 %. Podle obsahu legujících prvků a vlastností jsou vhodné pro řezné nástroje pro obrábění ocelí, ocelí na odlitky o vysoké pevnosti a tvrdosti a také pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů [1].

Rychlořezné oceli jsou charakteristické svou střední odolností proti opotřebení a vysokou lomovou pevností. Tyto vlastnosti jim poskytují široké pole uplatnění. Největší využití nalézají rychlořezné nástroje na poli tvarových nástrojů, vyrábějí se z nich výstružníky, závitníky, frézy menších průměrů a také nástroje, které jsou vystavovány rázům při přerušovaném řezu [1].

4.2.1 Rychlořezné oceli vyráběné práškovou metalurgií

Výrobky tohoto druhu mají oproti běžným RO řadu výhod. Rychlé tuhnutí atomizovaného prášku a rovnoměrné rozložení karbidů a nekovových vměstků zlepšuje houževnatost, rozměrovou stálost během tepelného zpracování i řezné vlastnosti takto vyráběných rychlořezných ocelí. Touto metodou se dají vyrábět oceli s vyšším obsahem legujících prvků, než je tomu při běžném způsobu výroby tavením [1].

4.3 Slinuté karbidy

Jsou produktem práškové metalurgie, jsou vyráběny z různých karbidů a kovového pojiva. Mezi nejdůležitější karbidy patří karbid wolframu WC, karbid titanu TiC, karbid tantalu TaC a karbid niobu NbC. Jako pojivo je používán kobalt Co [1].

Slinutý karbid je směsí dvou a více fází a není možné jej dále tepelně zpracovávat. Obsahové množství jednotlivých fází ovlivňuje tvrdost, houževnatost a odolnost proti otěru. Protože jsou slinuté karbidy velmi tvrdé, lze jejich tvar upravovat pouze broušením, elektroerozivním obráběním nebo lapováním [1].

V technické praxi se používají slinuté karbidy ve standardním provedení nebo se používají různé druhy povlaků.

4.3.1 Nepovlakované slinuté karbidy

Nepovlakované slinuté karbidy se v závislosti na složení a oblasti použití rozdělují do tří základních skupin.

Slinuté karbidy typu K – někdy také označovány jako jednodobidové SK. Jsou určeny pro obrábění materiálů, které tvoří krátkou drobnou třísku, jako jsou šedé litiny, nezelezné slitiny a nekovové materiály [10].

Slinuté karbidy typu P – někdy také označovány jako dvojkobidové SK. Jsou určeny pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku, jako jsou uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli [10].

Slinuté karbidy typu M – někdy také označovány jako vícekarbidové SK. Tato skupina má universální použití a je používán zejména pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jako jsou lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Vzhledem ke své vysoké houževnatosti jsou SK této skupiny používány také pro těžké hrubování a přerušované řezy [10].

4.3.2 Povlakované slinuté karbidy

Povlakované slinuté karbidy jsou vytvářeny tak, že se na podkladový materiál (slinutý karbid typu P, K nebo M) nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebením. Povlak má v této tenké vrstvě vyšší tvrdost i pevnost než stejný homogenní materiál. Tyto výhodné vlastnosti jsou důsledkem toho, že povlakový materiál neobsahuje pojivo, má jemnější zrnitost a méně strukturních defektů a tvoří bariéru proti difúznímu mechanismu opotřebením nástroje [12].

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition)

Probíhá při teplotách přesahujících 1000 °C. K výhodám této metody patří výborná adheze mezi povlakem a podkladem, možnost nanášení vrstev až o tloušťce 13 µm, povlakování předmětů složitých tvarů. K nevýhodám této metody patří nemožnost povlakovat ostré hrany, zbytková tahová pnutí v povlaku a ovlivnění podkladového materiálu, které má za následek snížení ohybové pevnosti [12].

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition)

Metoda je charakterizována pracovními teplotami pod 600 °C (dle některých pramenů i pod 350 °C). Původně byla metoda určena pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, v současné době se používá pro povlakování břitových destiček určených pro přerušovaný řez. Metoda nemá nepříznivý vliv na vlastnosti podkladu, vytváří zbytková tlaková pnutí v povlaku. Je možné povlakovat ostré hrany. Před povlakováním je nutné důkladně připravit povrch vzorku (odmastit, očistit). Vzorkem je nutné během povlakování otáčet v opačném případě by plochy, které jsou odvráceny od odpařovaného kovu, by zůstaly bez povlaku. Za možnou nevýhodu lze považovat i tenčí vrstvu povlaku kolem 5 µm, a menší možnosti výběru povlaku [12].

Metoda PCVD

Od klasické CVD metody se liší nižšími pracovními teplotami, které se pohybují v rozmezí 480 – 600 °C, nemění se ale základní princip metody tedy vytváření povlaku z plynné fáze. Metoda PCVD je založena na zvýšení energie plynné atmosféry v povlakovací komoře pomocí její ionizace a aktivace v plazmatickém výboji. Chemicky aktivovaná plazma umožňuje snížit teplotu potřebnou k ukládání povlaku na povrch substrátu. Plazma se vytváří za pomoci vnějšího elektrického napájecího zdroje (nízkofrekvenční nebo vysokofrekvenční střídavé napětí, stejnosměrné napětí, pulsní stejnosměrné) nebo reaktivním plynem (NH_3). Tuto metodu lze využít k vytváření povlaků TiN a TiCN [12].

Metoda MT CVD (Middle Temperature Chemical Vapour)

Rozsah pracovních teplot metody MT CVD se pohybuje v rozmezí 700 až 850 °C. jako vstupní sloučenina je acetonitril (CH_3CN). Zdrojem titanu je chlorid titaničitý (TiCl_4). Rychlost růstu vrstvy TiCN je u této metody přibližně třikrát větší jak u klasické vysokoteplotní CVD metody. Podkladový slinutý karbid se díky vysoké reaktivitě systému $\text{TiCl}_4 - \text{CH}_3\text{CN}$ nepodílí na ovlivňování povlaku, difuze z podkladu do povlaku je minimální. Hlavní výhodou této metody je nízká pracovní teplota, při které nedochází k poklesu houževnatosti podkladového SK a břitové destičky jsou odolnější proti mechanickým rázům a mohou být použity při vyšších hodnotách posuvových rychlostí. Destičky lze také vyrábět s většími kladnými úhly čela bez rizika, že při přerušovaném řezu dojde k vylomení ostří [12].

4.4 Cermety

Název tohoto obráběcího materiálu je tvořen slovním spojením CERamic/METal a vyjadřuje označení keramických částic v kovovém pojivu. Jsou vyráběny práškovou metalurgií, skládají se ze základního materiálu, kovového pojiva (Ni, Mo, Co), ve kterém jsou obsaženy tvrdé částice (TiC, TiN, TiCN, TaN). Spolu s větším obsahem TiC roste také tvrdost a odolnost proti deformaci. Oproti slinutým karbidům mají cermety menší houževnatost, z tohoto důvodu se především používají pro dokončovací operace. V praxi jsou mezi cermety řazeny materiály na bázi karbidu titanu, nitridu titanu a karbonitridu titanu [1].

4.5 Řezná keramika

Řezné materiály vyráběné z řezné keramiky jsou tvrdé, mají vysokou tvrdost za tepla a nereagují chemicky s povrchem obrobku. Je u nich zaručena vysoká trvanlivost břitu, odolává teplotám do 1200 °C, jejich použitelnost se pohybuje v rozmezí od 300 až 1600 m.min⁻¹. Řezná keramika je velmi křehký nástrojový materiál s nízkou tepelnou vodivostí. Vyrábí se ve tvaru destiček, ty jsou mechanicky upínány na řeznou část nástroje. Destičky jsou vyměnitelné a po opotřebení se vyřazují [1].

4.5.1 Řezná keramika na bázi oxidu hlinitého

Řeznou keramiku na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3 lze rozdělit na čistou, poločistou a směsnou.

Čistá keramika obsahuje 99,9 % Al_2O_3 . Je doporučována na dokončovací soustružení součástí vyráběných z šedé litiny, uhlíkových a nízkolegovaných ocelí

při řezné rychlosti přesahující $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Barva čisté keramiky lisované za studena je bílá, keramika lisovaná za tepla má šedou barvu [1].

Polosměsná keramika vznikne přidáním přísad do čisté keramiky. Nejčastější příměsí je oxid zirkoničitý ZrO_2 , může tvořit až 20 %. Dalšími přísadami směsné keramiky jsou $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$. Vyměnitelné břitové destičky vyráběné za tepla mají červenou barvu [1].

Směsná keramika obsahuje kromě Al_2O_3 přísadu 20 až 40 % karbidu titanu (TiC). Karbid titanu má ve srovnání s čistou keramikou větší odolnost proti teplotním a mechanickým rázům. Je vhodný zejména pro frézování šedé litiny a oceli, pro soustružení načisto a jemné soustružení cementačních ocelí, zušlechtěných ocelí a tvrdé litiny. Břitové destičky vyráběné za tepla mají červenou barvu [1].

Vyztužená keramika, někdy také označována jako keramika vyztužená viskerem, tento název je odvozen od vláken krystalu, který se nazývá visker. Viskery mají průměr $1 \mu\text{m}$ a délku více než $20 \mu\text{m}$, jsou z karbidu křemíku a vyznačují se vysokou pevností. Břitové destičky z vyztužené keramiky se vyznačují zvýšenou houževnatostí, pevností v tahu a odolností proti tepelnému šoku. Podíl viskeru v řezném materiálu je přibližně 30 %. Barvy břitových destiček je zelená. Tento druh keramiky je doporučován pro obrábění žáruvzdorných slitin, kalených ocelí, šedé litiny a také při obrábění přerušovaným řezem [1].

4.5.2 Řezná keramika na bázi nitridu křemíku

Řezná keramika na bázi nitridu křemíku se vyznačuje vysokou odolností proti mechanickému porušení břitu a doporučuje se pro hrubování i dokončování šedé litiny a litiny s hrubou kúrou. Je také vhodná pro obrábění přerušovaným řezem, odolná proti teplotním rázům, vhodná pro soustružení žárupevných slitin na bázi niklu a také pro obrábění s nekonstantní hloubkou řezu. Keramika na bázi Si_3N_4 si zachovává vysokou tvrdost i za teplot při kterých již nelze použít slinutý karbid. Tento řezný materiál je doporučován pro obrábění šedé litiny a to jak při obrábění za sucha tak i při chlazení [10].

4.6 Supertvrdé řezné materiály

Pod tímto souhrnným názvem jsou zahrnuty dva synteticky vyráběné materiály, konkrétně jsou to polykrystalický diamant (PD) a polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB). Vzhledem k velmi dobrým mechanickým vlastnostem lze oba tyto materiály použít jako řezné nástrojové materiály a to zejména pro speciální aplikace [10].

Diamant má nízkou teplotu tání, při teplotách nad $700 \text{ }^\circ\text{C}$ se mění na grafit, nesmí být používán pro obrábění materiálů na bázi železa (oceli a litiny). U těchto materiálů by při ohřevu docházelo k difuzi mezi nástrojem a obráběným materiálem a tím i k rychlému opotřebení, které by bylo důsledkem probíhajících chemických reakcí [10].

Kubický nitrid boru je vhodný pro soustružení a frézování kalených ocelí i tvrzené litiny. Minimální doporučená tvrdost obráběného materiálu je 45 HRC, obrábění materiálů s menší tvrdostí by bylo vzhledem k ceně nástroje neekonomické [10].

4.6.1 Polykrystalický kubický nitrid boru

Je zvláště tvrdým řezným materiálem, jeho tvrdost se přibližuje tvrdosti diamantu. Jeho výroba probíhá při vysokých teplotách a tlacích, při nichž dochází ke spojování kubických krystalů boru s keramickým nebo kovovým pojivem. Neuspořádané částice vytvářejí velmi hustou polykrystalickou strukturu. Krystal kubického nitridu boru je velmi podobný krystalu syntetického diamantu [technologie obrábění].

Polykrystalický kubický nitrid boru vykazuje vysokou tvrdost za tepla, velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení a při obrábění je také chemicky stabilní. Segmenty z PKNB tvoří řeznou část vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu, ale je také možné použít monolitické destičky [1].

Vyměnitelné břitové destičky z PKNB se používají hlavně pro obrábění tvrdých a žáruvzdorných materiálů, kalené oceli, nežíhané tvrdé litiny [1].

4.6.2 Polykrystalický diamant

Nejtvrdším známým materiálem je přírodní monokrystalický diamant, jehož tvrdosti syntetický polykrystalický diamant téměř dosahuje. Jemné krystaly diamantu jsou za vysokých teplot a tlaků spojovány slinováním. Vzájemná poloha krystalů je nahodilá a v žádném směru nevytváří místa, která by mohla být zdrojem lomu. Břity z polykrystalického diamantu se připevňují na vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu, destička jim zaručuje odolnost proti teplotním a rázovým šokům [1].

Polykrystalický diamant je využitelný pro obrábění všech neželezných kovů a nekovových materiálů [1].

4.7 Broušící materiály

Základní část broušících materiálů tvoří broušící zrna, která se používají ve formě volných zrn, zrn nanesených a přilepených k pružnému podkladu, zrn rozptýlených v mazadlech a tekutinách nebo zrn spojených pojivem v tuhé těleso [1].

V technické praxi se využívají broušící materiály na bázi Al_2O_3 nebo SiC, diamantové broušící materiály a broušící materiály z kubického nitridu boru [1].

4.7.1 Standartní broušící materiály

Jsou broušící materiály typu Al_2O_3 (umělý korund) a broušící materiály typu SiC (karborundum) tyto dva typy patří k technologicky nejrozšířenějším. Označování a identifikace vlastností těchto kotoučů má řadu společných znaků a jsou tedy charakterizovány společně [1,4].

Dělení standartních brousicích materiálů, jejich charakteristika a spektrum použití [4,13]:

SiC černý	C 48	Syntetický materiál s vysokou tvrdostí. Používá se pro broušení materiálů s nízkou pevností, šedé litiny, temperované litiny, mosazi, bronzu. Velmi tvrdý materiál, křehký a citlivý na nárazy a údery. Používá se pro broušení slinutých karbidů, keramických hmot, skla a z části také pro broušení kyselinovzdorných ocelí s austenitickou strukturou.
SiC zelený	C 49	
Al ₂ O ₃ bílý	A 99 B	Je tvrdý a křehký. Používá se pro broušení nástrojů z nástrojových a rychlořezných ocelí, a také pro broušení kalených a nerezavějících ocelí.
Al ₂ O ₃ barvený	A 99	
Al ₂ O ₃ růžový	A 98	Je tvrdý a houževnatý, odolný proti opotřebení hrany a nárazu. Použití pro broušení vysoce legovaných ocelí.
Al ₂ O ₃ hnědý	A 96	Je velice tvrdý a houževnatý. Používá se pro broušení nízce legovaných ocelí a kovových materiálů střední a vysoké pevnosti.

4.7.2 Brousicí kotouče ze supertvrdých řezných materiálů

Využití vlastností super tvrdých materiálů, diamantu a kubického nitridu boru, a to zejména jejich tvrdosti a tepelné odolnosti, umožňuje ve výrobě brousicích kotoučů připravit nástroje, které mají jemnou strukturu, vysokou odolnost proti opotřebení a stálostí tvaru i řezných vlastností [14].

Diamant je nejtvrdějším řezným materiálem. Z hlediska obrábění je důležitá jeho tepelná stálost asi do 800 °C. Z důvodů afinity k železu za vysokých teplot není diamant vhodný pro broušení ocelí. Při broušení vzniká v místě řezu velké množství tepla, které způsobí chemickou reakci, tato reakce ovlivní strukturu diamantu i broušeného povrchu [14].

Kubický nitrid boru (dále jen KNB) je syntetický materiál s vlastnostmi, které jsou velmi podobné vlastnostem diamantu. Má však vyšší teplotní stálost a tepelnou odolnost, asi do 1200 °C. Z těchto důvodů se používá především na opracování vysoce pevných ocelí. Vlastnosti povrchů dokončených KNB jsou vesměs lepší jak po broušení jinými brusivy, proto se KNB používá pro produkční broušení při výrobě nástrojů, ložisek, v automobilovém a leteckém průmyslu [14].

I přes vysoké pořizovací náklady přináší použití diamantových a KNB kotoučů následující výhody [14]:

- možnost obrábět tvrdé materiály, jenž jsou klasickými brusivy těžko obrobitelné nebo zcela vůbec neobrobitelné,
- vysoký výkon broušení,
- vysoká životnost a stálost brousicího kotouče.

Brousicí kotouč je tvořen tělesem s nanesenou brousicí vrstvou, obsahující zrna brusiva rozptýlená v pojivu. Těleso kotouče bývá provedeno ze slitin Al, oceli, bronzu nebo kompozitních materiálů. Volba vhodného tělesa musí odpovídat provozním podmínkám kotouče. Musí tedy splňovat požadavky na statickou a dynamickou pevnost, tuhost, odolnost proti vibracím, tepelnou vodivost [14].

5 KRITÉRIA PRO VYHODNOCOVÁNÍ KVALITY POVRCHU

Struktura povrchu je členěna na jednotlivé složky podle rozteče příslušných nerovností. Jde o složku s nejmenší roztečí tvořící drsnost povrchu, dále složku nazvanou vlnitost povrchu a složku s největší roztečí nerovnosti určenou základním profilem. Normou ČSN EN ISO 4287 definuje tyto geometrické parametry [15]:

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

Základním zdrojem informace je profil (profilová metoda). Norma ČSN EN ISO 4287 definuje [15]:

Profil povrchu – průsečnice skutečného povrchu a dané roviny [15].

Snímaný povrch – geometrické místo středů snímacího hrotu stanovených parametrů (od něj se odvozují ostatní profily) [15].

Referenční profil – dráha, po které se snímač podél vedení pohybuje v rovině řezu [15].

Základní profil – úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s . Reprezentuje základnu pro číslicové zpracování profilu pomocí filtru profilu a pro výpočet a hodnocení parametrů profilu. Základním profilem není tvar získaný metodou nejmenších čtverců [15].

Zbytkový profil – základní profil získaný snímáním ideálně hladkého a rovného povrchu. Zbytkový profil se skládá z odchylek vedení, vnějších a vnitřních poruch a odchylek vzniklých při přenosu profilu [15].

Profil drsnosti – profil odvozený ze základního profilu potlačením složek použitého filtru profilu λ_c . Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů drsnosti [15].

Profil vlnitosti – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru λ_c na základní profil [15].

Filtrace je proces odstraňování nežádoucích složek profilu. Hodnota, která odděluje dlouhovlnné složky od krátkovlnných, se nazývá mezní vlnová délka filtru [15].

Filtry profilu

Filtr λ_s – definuje rozhraní mezi drsností a krátkovlnnými složkami [15].

Filtr λ_c – určuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti [15].

Filtr λ_f – určuje rozhraní mezi vlnitostí a dalšími složkami přítomnými na povrchu [15].

Základní délka l_r – délka ve směru osy x používaná pro rozpoznání nerovností charakterizujících daný profil. Základní délka pro drsnost l_r je číselně rovna hodnotě filtru λ_c [15].

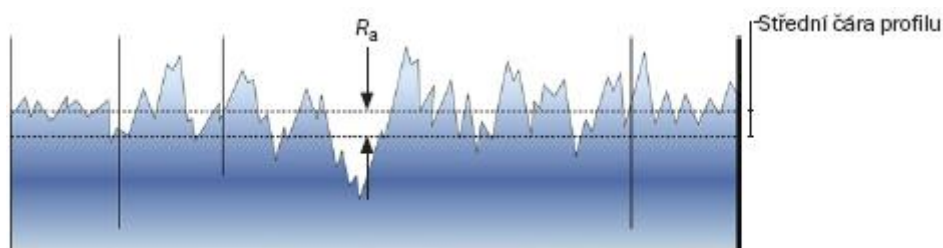
Vyhodnocovaná délka l_n – délka ve směru osy x používaná pro posouzení vyhodnocovaného profilu, vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu i více základních délek [15].

5.1 Parametry drsnosti

Výsledkem kvantitativní metody je soubor odchylek povrchu od nulové hodnoty. Drsnost povrchu posuzujeme v soustavě střední čáry. V ní se drsnost posuzuje podle střední aritmetické úchyly R_a a z výšky nerovností R_z [5].

5.1.1 Posouzení drsnosti dle Střední aritmetické úchyly R_a

Střední hodnota všech odchylek od střední čáry profilu na vyhodnocované délce, bez ohledu na jejich vertikální směr. To znamená, že pomocí hodnoty R_a nelze určit, zda odchylky mají charakter výstupků nebo prohlubní. Hodnota R_a není významně ovlivňována ojedinělými odchylkami [5].

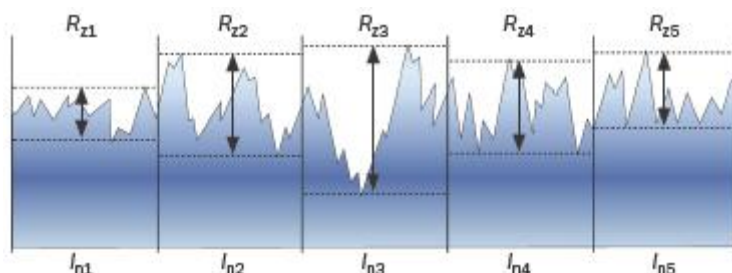


Obr. 4.1 Vyhodnocení střední aritmetické úchyly posuzovaného profilu [5].

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (4.1)$$

5.1.2 Posouzení profilu dle Maximální výšky profilu R_z

Výška nerovnosti R_z je střední vzdálenost mezi pěti nejvyššími a pěti nejnižšími body zjištěného profilu v délce měřeného úseku. Měří se kolmo na střední m-čáru profilu [5].

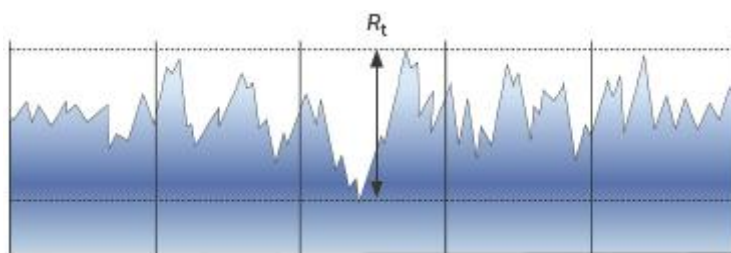


Obr. 4.2 Vyhodnocení maximální výšky profilu [5].

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5} \quad (4.2)$$

5.1.3 Posouzení profilu dle Celkové výšky profilu R_t

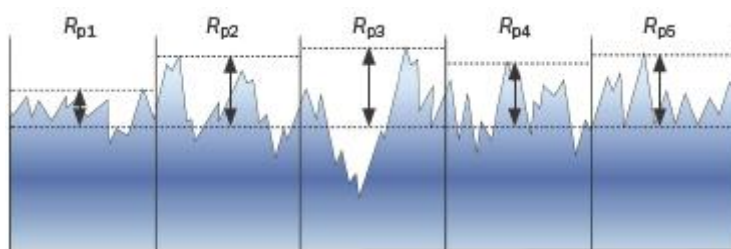
Celková výška profilu je součtem výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu na vyhodnocované délce. Nezávislá hodnota R_t (nesouvisí s R_a nebo R_z) představuje jeden z nejpřísnějších požadavků na R-profil [5].



Obr. 4.3 Celková výška profilu [5].

5.1.4 Posouzení profilu dle Maximální výšky výstupku profilu R_p

Maximální výška výstupku profilu je střední hodnota jednotlivých největších výšek výstupků profilu, stanovených pro jednotlivé základní délky. Tento parametr jakosti povrchu lze použít pro stanovení údajů o vlastnostech povrchu [5].



Obr. 4.4. Maximální výška výstupku profilu [5].

$$R_p = \frac{R_{p1} + R_{p2} + R_{p3} + R_{p4} + R_{p5}}{5} \quad (4.3)$$

6 SORTIMENT ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ A VOLBA ŘEZNÝCH PODMÍNEK

6.1 Soustružení

Seco Tools je švédská společnost, která má ve svém sortimentu přes 23000 druhů produktů. V sortimentu jsou nástroje s břitovými destičkami ze slinutých karbidů, kubického nitridu boru a polykrystalického diamantu pro soustružení, frézování a vrtání.

6.1.1 Seco Tools

TP1501 – vyznačuje se vysokou odolností proti opotřebení, odolává vysokým teplotám. Je určena pro aplikace u ocelí, legovaných ocelí a litin. Vhodná pro obrábění za sucha [16].

TH1500 – je tvořena jemnozrnnou strukturou s CVD povlakem $Ti(C,N)+Al_2O_3$. Určena pro obrábění kalených ocelí [16].

TH1000 – je tvořena velmi tvrdou mikrostrukturou s PVD povlakem $Ti-Al-Si-N$, vhodná pro kalené oceli. Vzhledem k vysoké houževnatosti břítu umožňuje vysoký výkon při přerušovaných řezech a velký úběr materiálu u kalených ocelí [16].

890 – nepovlakovaná jemnozrnná třída s vysokou tvrdostí a dobrou houževnatostí. Určena pro vysoce legované a titanové slitiny. Vhodná pro obrábění i jiných materiálů [16].

CBN010 – destička má připájený prvek, nebo celistvou spékanou vrstvu. Je tvořena 50% KNB, průměrná velikost zrna je 2 μm a keramickým pojivem (TiC). Destičky jsou bez povlakování [16].

CBN060K – destička je monolitní, má připájený prvek, nebo spékanou povrchovou vrstvu. Je tvořena 50% KNB, průměrná velikost zrna je 1-2 μm a keramickým pojivem (TiC). Povlak destiček tvoří (Ti, Si, Al)N [16].

CBN150 – destička má připájený prvek nebo celistvou spékanou vrstvu. Je tvořena 45% KNB, průměrná velikost zrna je < 1 μm a keramickým pojivem (TiCN). Destička je bez povlaku [16].

CBN160C – destička má připájený prvek nebo celistvou spékanou vrstvu. Je tvořena 65% KNB, průměrná velikost zrna je < 1 μm a keramickým pojivem (TiCN). Povlak destiček tvoří (Ti,Si)N [16].

CBN200 – destička má připájený prvek nebo celistvou spékanou vrstvu. Je tvořena 85% KNB, průměrná velikost zrna je 2 μm a keramickým pojivem (Co+W+Al). Destičky jsou bez povlaku [16].

CBN200 (monolitní) – destička je monolitní. Je tvořena 90% KNB, průměrná velikost zrna je 3-6 μm a keramickým pojivem (Al). Destičky jsou bez povlaku [16].

CBN300 – destička je monolitní. Je tvořena 90% KNB, průměrná velikost zrna je 22 μm a keramickým pojivem (Al). Destičky jsou bez povlaku [16].

CBN300P – destička je monolitní. Je tvořena 90% KNB, průměrná velikost zrna je 22 μm a keramickým pojivem (Al). Povlak destiček tvoří (Ti,Al)N [16].

Příklady použití břitových destiček z PKNB [16]:

Následující řezné materiály lze použít bez chlazení i s použitím chladicí kapaliny. Odváděné třísky musí být plně vyžíhané a křehké.

Pro nepřerušované obrábění [16]:

Vhodným materiálem pro obrábění na čisto je CBN060K.

Univerzální třídou pro obrábění na čisto je CBN010.

Pro hrubování použijeme CBN200 nebo SBN300.

Pro vysokou jakost povrchu použijeme CBN150.

Při přerušovaném obrábění [16]:

Pro středně přerušované řezy použijeme CBN060K nebo CBN010.

Pro silně přerušované řezy použijeme CBN160C nebo CBN150.

Řezné podmínky pro výše uvedené řezné materiály jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 1 Doporučená řezná rychlost, stanovená na základě specifických podmínek a zvolené materiálové třídy Seco Tools. Životnost nástroje: 15 min; $a_p = 1,5$ mm [16].

SMG	TH1000		
	f (mm/ot)		
	0,1	0,25	0,4
H3	90	70	55
H5	170	125	100
H7	90	70	55

Tab. 2 Doporučená řezná rychlost, stanovená na základě specifických podmínek a zvolené materiálové třídy Seco Tools. Životnost nástroje: 15 min; $a_p = 1,5$ mm [16].

SMG	TH1000		
	f (mm/ot)		
	0,1	0,25	0,4
H3	125	80	60
H5	230	150	110
H7	125	80	60

Tab. 3 Doporučené řezné podmínky pro dokončování PCBN s $a_p < 0,5$ mm [16].

SMG	CBN010		CBN060K	
	v_c	f	v_c	f
H3	80 – 230	0,03 – 0,25	100 – 240	0,03 – 0,28
H5	80 – 215	0,03 – 0,25	90 – 220	0,03 – 0,28
H7	100 – 220	0,06 – 0,18	100 – 230	0,06 – 0,2

Tab. 4 Doporučené řezné podmínky pro dokončování PCBN s $a_p < 0,5$ mm [16].

SMG	CBN150		CBN160C	
	v_c	f	v_c	f
H3	75 – 180	0,03 – 0,2	100 – 200	0,03 – 0,24
H5	70 – 160	0,03 – 0,2	90 – 180	0,03 – 0,24
H7	100 - 170	0,05 – 0,17	100 – 190	0,07 – 0,21

Tab. 5 Doporučené řezné podmínky pro hrubování PCBN s $a_p 0,5 – 3,0$ mm [16].

SMG	CBN200		CBN300	
	v_c	f	v_c	f
H7	70 – 150	0,08 – 0,22	90 – 200	0,08 – 0,28

6.1.2 Iscar

Izraelská společnost Iscar patří již řadu let k předním výrobcům a dodavatelům obráběcích nástrojů a řezných materiálů. Jejich výrobky nacházejí uplatnění v nejrůznějších průmyslových odvětvích. Strategie firmy nespočívá jen v důrazu na vysokou kvalitu a výkonnost vyráběných nástrojů a řezných materiálů, ale také v jejich uplatnitelnosti nejen v podmínkách velkých průmyslových podniků se sériovou i kusovou výrobou, ale i drobnějších výrobců, kteří mají mnohdy specifické požadavky na používané nástroje.

IB10HC – destička s pájeným břitem z velmi jemného KNB a TiN povlakem s velkou odolností proti opotřebení. Pro střední a vysoké řezné rychlosti a nepřerušovaný řez [17].

IB10H – destička je tvořena velmi jemným substrátem ($0,5 \mu\text{m}$) PKNB, je určena pro nepřerušovaný nebo lehce přerušovaný řez [17].

IB50 – vhodný pro dokončování kalených ocelí bez přerušovaného řezu [17].

IB55 – polodokončovací operace u kalených ocelí, snáší přerušovaný řez [17].

IB20H – destička z nepovlakovaným PKNB pro všeobecné použití. Dobrá odolnost proti opotřebení a rázům, pro obrábění nepřerušovaným a přerušovaným řezem [17].

IB25HC – destička s pájeným KNB s povlakem Ti(C,N,O). Pro vysoké řezné rychlosti s nepřerušovaným i přerušovaným řezem [17].

IB25HA – destička s pájeným KNB s povlakem Ti(C,N). Vyznačuje se velkou houževnatostí. Všeobecné použití pro obrábění kalené oceli [17].

Tab. 6 Doporučené řezné podmínky pro soustružení. Hodnoty posuvu výrobce neuvádí [17].

Kaleno na	IB10HC	IB10H	IB50/55	IB20H	IB25HC	IB25HA
55 HRC	150-350	100-220	100-140	100-220	100-220	90-200
60 HRC	150-350	100-220	80-120	100-220	100-220	90-200

6.1.3 DornerPramet

V roce 2014 se společnost Pramet Tools spojila se společností Dorner Tools, která se zabývá výrobou monolitních nástrojů. Společnost Pramet Tools se zabývá vývojem, výrobou a distribucí nástrojů ze slinutého karbidu. Navazuje na dlouholetou tradici výroby slinutého karbidu v Šumperku.

T5305 – destička je tvořena jemnozrnným substrátem s nízkým obsahem kobaltu, se silnou vrstvou MT-CVD povlaku s vrstvou Al_2O_3 . Destička určena pro vysoké řezné rychlosti, kontinuální a mírně přerušovaný řez [18].

T5315 – destička je tvořena jemnozrnným substrátem s upraveným obsahem kobaltu pro zvýšení houževnatosti, se silnou vrstvou MT-CVD povlak kombinující výhody TiCN a Al_2O_3 vrstev. Použitelný pro dokončovací a hrubovací operace, střední a vysoké řezné rychlosti, vhodné pro kontinuální i přerušovaný řez [18].

T8315 – destička je tvořena submikronovým substrátem s relativně nízkým obsahem kobaltu s nano-vrstevnatým PVD povlakem s gradientními přechody. Povlak se vyznačuje sníženým vnitřním pnutím při zvýšení tvrdosti. Materiál má zmenšené vrubové opotřebení na hlavním břitu. Destička je určena pro vyšší řezné rychlosti, střední průřezy třísek a stabilní záběrové podmínky [18].

T8330 – destička je tvořena submikronovým substrátem s relativně vysokým obsahem kobaltu s nano-vrstevnatým PVD povlakem s gradientními přechody. Povlak se vyznačuje sníženým vnitřním pnutím při zvýšení tvrdosti. Destička má dobrou provozní spolehlivost, je určena pro střední řezné rychlosti a ztížené záběrové podmínky [18].

T9310 – destička je tvořena gradientním substrátem s nízkým obsahem kobaltu. Povlakována Al_2O_3 . Vyznačuje se mimořádnou tepelnou a chemickou stabilitou, která zaručuje vynikající ochranu podkladového materiálu. Destička je vhodná pro vysoké řezné rychlosti. Kontinuální a mírně přerušovaný řez [18].

T9315 – destička je tvořena gradientním substrátem s jemnou strukturou s relativně nízkým obsahem kobaltu. Povlak má dominantní vrstvu Al_2O_3 . Destička je určena pro vysoké řezné rychlosti. Kontinuální a mírně přerušovaný řez [18].

TC100 – destička je tvořena směsnou keramikou na bázi Al_2O_3 a TiC. Materiál je určen pro vysoké řezné rychlosti. Vhodný pro obrábění kalené oceli s tvrdostí do 65 HRC [18].

TB310 – destička je vyrobena z PKNB. Je určena pro obrábění kalených ocelí. Odolná proti otěru [18].

Tab. 7 Doporučené řezné rychlosti v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] při trvanlivosti $T=15$ min [18].

	posuv	hloubka řezu	T5305	T5315	T9310	T9315
jemné soustružení	0,05	0,5	-	-	-	-
	0,08	0,5	-	-	-	-
	0,10	0,5	100	-	-	-
dokončovací soustružení	0,10	1,5	90	70	70	65
	0,15	1,5	75	65	65	60
	0,20	1,5	70	60	60	55
polohrubovací soustružení	0,20	2,5	65	60	55	55
	0,30	2,5	55	55	50	50
	0,40	2,5	50	50	45	45
	posuv	hloubka řezu	T8315	T8330	TC100	TB310
jemné soustružení	0,05	0,5	-	-	200	200
	0,08	0,5	-	-	170	180
	0,10	0,5	65	-	160	160
dokončovací soustružení	0,10	1,5	55	45	150	145
	0,15	1,5	50	40	130	130
	0,20	1,5	45	35	115	115
polohrubovací soustružení	0,20	2,5	45	35	115	-
	0,30	2,5	40	30	100	-
	0,40	2,5	-	30	95	-

6.2 Broušení kalených ocelí

I přes svoji vyšší pořizovací cenu přináší používání kotoučů z KNB nesporné výhody a úspory. Mezi tyto výhody například patří [19]:

- možnost opracování tvrdých materiálů, které jsou běžnými brusivy těžko obrobitelné nebo neobrobitelné,
- vysoký výkon broušení, vysoká produktivita práce,
- vysoká životnost a stálost kotouče.

Brousicí kotouč z kubického nitridu boru je charakterizován následujícími základními znaky:

Pojivo – ovlivňuje výkon broušení, životnost, tvarovou stálost a samoostřicí vlastnosti kotouče. Volbou pojiva ovlivňujeme, zda kotouč bude brousit s velkým výkonem při malém přtlaku a krátkou životností (měkké pojivo), nebo s velkou životností při nízkém výkonu s větším přtlakem (tvrdé pojivo) [19].

Zrnitost brusiva – ovlivňuje drsnost povrchu broušeného předmětu, ale i úběruschopnost brousicího kotouče [20].

Koncentrace brusiva – vyjadřuje hmotnost brusiva k objemu brusné vrstvy, je udávána v procentech. Nízká koncentrace podporuje samoostřicí vlastnosti brousicího kotouče, snižuje vývin tepla, ale na druhé straně snižuje životnost a stálost tvaru a zvyšuje drsnost povrchu [20].

Chlazení brousicích kotoučů – chlazení zvyšuje životnost brousicího kotouče, trvanlivost a zlepšuje kvalitu broušeného povrchu. Kotouče určené pro broušení za sucha obsahují pojivo podporující samoostřicí efekt, to je však na úkor životnosti kotouče. Chlazení se doporučuje užívat ve všech případech, kdy to dovoluje vybavení stroje a charakteristika práce. Chladicí kapalina musí být přiváděna do místa styku kotouče s obrobkem tak, aby byla strhávána do řezu. Pro chlazení kotoučů vyráběných z kubického nitridu boru a diamantu jsou určeny speciální chladicí kapaliny [19].

Údržba brousicího kotouče – čištění kotouče se provádí neprodleně poté, co dojde ke zhoršení jeho brousicích vlastností. To je obvykle způsobeno zanesením povrchové vrstvy obroušeným materiálem při broušení bez chlazení, nebo broušením nevhodného materiálu. Čištění se provádí za pomoci korundového oživovacího kamene, pemzou, nebo alespoň úlomkem SiC kotouče. Je vhodné před čištěním keramický oživovač navlhčit [19].

Doporučené řezné podmínky pro broušení kalených ocelí [21].

Druh broušení	Vazba kotouče	Řezná rychlost	Rychlost otáčení obrobku	Podélný posuv	Přísuv
		m/s	m/min	m/min	mm/průchod
Broušení vnějších válcových ploch	pryskyřičná	30 – 40	8 – 10	0,5 – 1,0	0,002 – 0,01
	keramická	30 – 35	10 – 25	0,5 – 1,0	0,01 – 0,05
Broušení vnitřních válcových ploch	pryskyřičná	-	-	-	-
	keramická	10 – 35	0,3 – 1,0	0,3 – 1,0	0,002 – 0,005

7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Časová náročnost obrábění tvrdých dílů je neustále snižována vývojem nových nástrojů a obráběcích strojů specializovaných na tuto oblast. Nové druhy řezných materiálů umožňují zvýšení řezné rychlosti a nové geometrie břitu zvýšení rychlosti posuvu. O zkrácení dob obrábění se kromě omezení času potřebného k nastavení stroje, manipulace s obrobky a jejich kontroly zasloužila i možnost obrábět díly na jedno upnutí [22].

Minimální spotřeba času nutná na výměnu, seřízení a upnutí řezného nástroje do stroje při dodržení minimální přesnosti patří k základním funkčním požadavkům na řezné nástroje. Splnění těchto požadavků je zajištěno především konstrukcí nástroje a přesností jeho výrobního provedení. Zvýšením kvality prvků konstrukce je uspořádání a provedení polohovacích, seřizovacích a upínacích elementů nástroje. Prvořadá pozornost je věnována zejména umístění, seřizování a upínání řezných částí nástroje. Prosazuje se snaha o využití co nejmenšího počtu součástí použitých na seřizovací a upínací mechanismy [23].

Přední výrobci řezných nástrojů se mimo zlepšování technických parametrů svých výrobků soustřeďují také na přípravu přípravků a systémů, které jejich uživatelům umožní technické a ekonomické využití jejich nástrojů. Rozšiřuje se také nabídka technických nebo organizačních prostředků, které umožňují sledovat nástroj a jeho stav v průběhu celé jeho životnosti. Tyto systémy umožňují evidovat a organizačně zajišťovat přeostření, údržbu, výměnu, plynulé doplňování zásob i likvidaci opotřebeného řezného nástroje. Význam těchto systémů vzrůstá spolu s rozšiřujícím se využíváním nákladných řezných materiálů – syntetického diamantu a kubického nitridu boru [23].

Požadavek vysoké produktivity a minimálních nákladů při obrábění na CNC strojích vyvolává vysoké nároky na úroveň nástrojů s výměnnými břitovými destičkami. Tyto nástroje mají dnes dominantní podíl v moderní technologii obrábění. Jde především o požadavek vysokého řezného výkonu, tedy velkého minutového úběru obráběného materiálu, vysoké provozní spolehlivosti při vysoké rovnoměrnosti řezných vlastností. Dalším významným faktorem je maximální odolnost břitu proti mechanickým a teplotním rázům [24].

Náklady na nástroj osazený vyměnitelnou břitovou destičkou a jeho výměnu lze vyjádřit ze vztahu [3]:

$$N_T = \frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_3 \text{ [Kč]} \quad (7.1)$$

- Kde: N_1 [Kč] - je cena VBD,
 N_2 [Kč] - cena držáku,
 N_3 [Kč] - náklady na upnutí a seřízení VBD,
 n_B [-] - počet břitů VBD,
 z [-] - životnost držáku VBD.

Počet obrobů během trvanlivosti břitů vypočteme ze vztahu [3]:

$$Q_T = \frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}} \text{ [ks]} \quad (7.2)$$

Kde: T [min] - trvanlivost břitů,

$\lambda \cdot t_{AS}$ [min] - čistý čas řezání, nůž je v záběru a tvoří se tříška.

Moderní obráběcí stroje jsou koncepčně zaměřeny především na zkrácení vedlejších strojních časů a tím na kvalitativně vyšší stupeň využití časového fondu stroje pro vlastní řezání. Za těchto podmínek, kdy v průměru po více než 80 % doby chodu stroje probíhá obrábění, má zásadní význam na produktivitu, neboli počet obrobků na jednotku času nasazení VBD z materiálu s maximálním řezným výkonem. Pro dosažení optimálních nákladů na obrobek je důležité použití nákladově hospodárných řezných podmínek [24].

Zvýšením hodnot řezných podmínek a optimalizací řezného procesu lze výrazně snížit náklady na součást a zvýšit zisk. V mnoha případech je výhodnější zvýšení řezných podmínek, než prodloužení životnosti nástroje. Z tohoto důvodu je výhodnější použít nástrojů, které umožňují použití za vysokých řezných podmínek [5].

Ve srovnání s hodnotami řezných podmínek, má životnost nástrojů a jejich cena pouze zanedbatelný vliv na výši nákladů na součást. Náklady na součást jsou ve skutečnosti závislé na parametrech obráběcího procesu a skladbě nákladových položek konkrétního podniku [5].

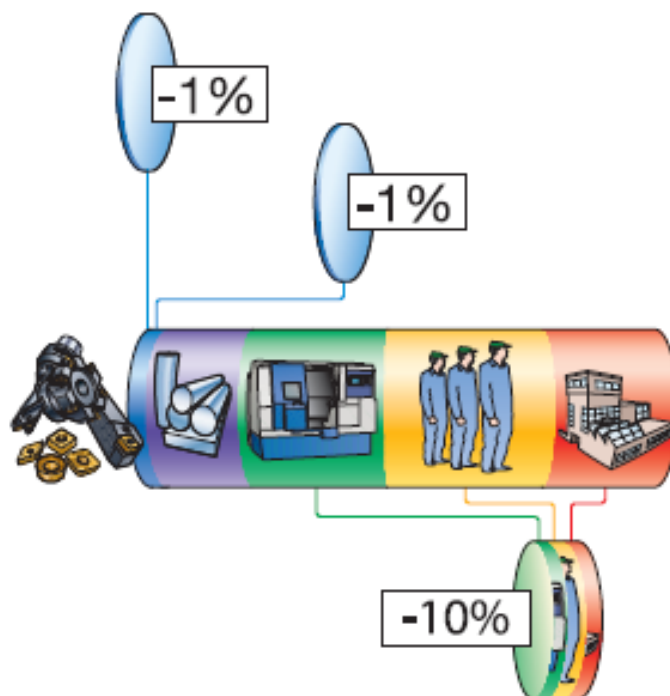
Jako příklad lze uvést, že 20% zvýšení hodnot řezných podmínek umožní snížení nákladů na součást o více jak 10 % v důsledku to, že příznivě ovlivní náklady na stroj, obsluhu a režijní náklady. Ale zvýšení životnosti nástroje o 50 % nebo snížení nákladů na nástroje o 30 % obvykle vede jen k 1% snížení nákladů na součást. To je způsobeno tím, že náklady na nástroje v průměru dosahují jen 3 – 5 % z výrobních nákladů [5].

Jedním z nejslabších článků technické přípravy je v současnosti optimalizace řezných podmínek. Její podstatou je stanovení optimálních řezných podmínek (hloubky řezu, posuvu a řezné rychlosti) a optimální trvanlivosti nástroje, a to sice podle optimalizačního kritéria a za učených okrajových podmínek. Jde tedy o hledání extrému účelové funkce nad oblastí přístupných řešení. Tato oblast je určena společným průnikem všech omezujících podmínek, které se při obrábění vyskytují [25].

Základním optimalizačním kritériem ve strojírenské technologii je kritérium minimálních výrobních nákladů. Toto kritérium by mělo být zásadně aplikováno, pokud nejsou důvody k využití jiného kritéria (např. kritéria maximální produktivity) [25].

Optimalizace řezných podmínek je ovlivňována celou řadou parametrů. Především jsou to nákladové položky (v případě že uvažujeme optimalizaci podle kritéria minimálních výrobních nákladů). Jde o ceny strojů, které ovlivňují provozní náklady, mzdy pracovníků, režijní položky, ceny nástrojů, náklady na jejich ostření. Tyto

nákladové položky představují významnou skupinu dat, které je nutné zahrnout do optimalizace [25].



Obr. 7.1 Vliv nákladů na výrobek při snížení životnosti a řezných podmínek [5].

Vývojové trendy v technologii obrábění, jakožto dokončovací technologie, úzce souvisí s funkčními vlastnostmi povrchu, respektive s integritou povrchu. Vzdávající světová konkurence vytváří silný ekonomický tlak na podniky, které musí produkovat výrobky s minimálními výrobními náklady. Výrobní náklady představují přibližně 40 % ceny strojírenských výrobků. Technologie obrábění představuje asi 30 % pracnosti všech strojírenských technologií zúčastňujících se výroby. Význam technologie obrábění na tvorbě cen strojírenských výrobků je značný [26].

Vývoj řezných materiálů umožňuje nasazení vysokých hodnot řezných podmínek především řezných rychlostí. Toto úzce souvisí s výrobními náklady. Zvyšování řezných rychlostí vede ke snížení strojních časů. Současně je však ovlivněna integrita povrchu. Velikost poloměru ostří výrazně ovlivňuje minimální tloušťku odřezávané vrstvy. Současně se zvětšuje tření na hřbetu s dalšími doprovodnými jevy [26].

Při broušení klasickými broušícími kotouči většinou vzniká v povrchové vrstvě nepříznivé tahové napětí je snahou nahrazovat broušení tzv. tvrdým obráběním. Nástroje s definovanou geometrií břitu. Tuto technologii umožňuje např. KNB [26].

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá obráběním rotačních součástí vyráběných z kalených ocelí. V práci jsou rozebrány základní obráběcí metody obrábění, které jsou pro výrobu rotačních součástí používány. Dále jsou charakterizovány materiály, které jsou určeny ke kalení, jejich tepelné zpracování.

Jsou také charakterizovány řezné materiály používané při obrábění kalených ocelí. A to jak materiály používané při soustružení, tak i materiály určené k broušení.

Většina výrobců řezných materiálů má ve svých výrobních programech zahrnuty materiály, které jsou určeny speciálně k obrábění kalených ocelí. Těmito materiály jsou především povlakované slinuté karbidy, řezná keramika, a kubický nitrid boru.

Dále jsou charakterizovány řezné materiály, které jsou používány pro obrábění kalených ocelí. Porovnávány byly dvě metody, soustružení a broušení, které se k obrábění kalených ocelí používají.

Většina výrobců řezných materiálů má ve svých výrobních programech zahrnuty materiály, které jsou určeny speciálně k obrábění kalených ocelí. Těmito materiály jsou povlakované slinuté karbidy, výměnné břitové destičky z kubického nitridu a to jak monolitní, tak tvořené základovým materiálem s připájeným břitem z kubického nitridu boru.

Aby bylo použití materiálů na bázi kubického nitridu boru ekonomické, je třeba dodržet minimální tvrdost obráběného materiálu 45 HRC.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOČMAN, K., PÍŠKA, M. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické Nakladatelství CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
2. HUMÁR, A., *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory*. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění [online]. 2004 [vid.13.3.2015], 95 s. Dostupné z [www: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
3. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
4. HUMÁR, A., *Technologie I: Technologie obrábění – 3. část. Studijní opory*. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění [online]. 2005 [vid.13.3.2015], 57 s. Dostupné z [www: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
5. AB SANDVIK Coromant. *Technická příručka* [online]. [vid. 20.3.2015] Dostupné z [www: http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/Technical%20Guide.zip](http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/Technical%20Guide.zip)
6. PTÁČEK, L. a kol., *Nauka o materiálu*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 396 s. ISBN 80-7204-278-3
7. MOLÍKOVÁ, E., *Nauka o materiálu – Distanční výuka* [online] 2010. [vid. 20.3.2015]. Dostupné z [www:http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/nomd/Index.html](http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/nomd/Index.html)
8. VÁŇOVÁ, P., *Základy tepelného zpracování*. Studijní opory. VŠB-TUO Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství [online]. [vid. 19.5.2015] 128 s. Dostupné z [www: http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Vanova_ZTZ.pdf](http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Vanova_ZTZ.pdf)
9. *Tepelné zpracování oceli: teorie*. VŠCHT – Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství [online]. 2011 [vid. 17.3.2015]. Dostupné z [www: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_oceli/teorie2.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_oceli/teorie2.htm)
10. HUMÁR, A., *Materiály pro řezné nástroje*. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění [online]. 2006 [vid.7.4.2015], 192 s. Dostupné z [www: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf)
11. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta strojní. *Keramika* [online]. [vid. 30.4.2015]. Dostupné z [www: http://www.ateam.zcu.cz/keramika.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/keramika.pdf)
12. MM průmyslové spektrum: *Trendy v povlakování slynutých karbidů*. Praha: SEND předplatné s.r.o., 2001. ISSN 1212-2572. Kód článku: 010705. Dostupné z [www: http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slynutych-karbidu.html](http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slynutych-karbidu.html)

13. BEST-HOLDING, výrobce a prodejce brusiva. Best - Business, a.s [online]. (c) 2015 [vid. 30.4.2015]. Dostupné z www: http://www.bestb.cz/brousici_materialy.php
14. MM průmyslové spektrum: *Brousicí kotouče ze super tvrdých materiálů*. Praha: SEND předplatné s.r.o., 2001. ISSN 1212-2572. Kód článku: 010708. Dostupné z www: <http://www.mmspektrum.com/clanek/brousici-kotouce-ze-supertvrдых-reznych-materialu.html>
15. TICHÁ, Šárka, *Strojírenská metrologie část 1*. Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní [online]. [vid. 9.5.2015], 110 s. Dostupné z www: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
16. SECO TOOLS. *Katalog a technický průvodce 2015 – Soustružení* [online]. Seco Tools 2015, 703 s. [vid. 15.4.2015] Dostupné z www: http://www.secotools.com/CorpWeb/Czech%20Republic/katalogy/2015/CZ_Catalog_Turning_2015_LR.pdf
17. ISCAR, *Katalog nástrojů pro soustružení a závitování* [online]. ISCAR ČR s.r.o. 2015, 464 s. [vid. 17.4.2015] Dostupné z www: http://www.iscar.cz/Catalogs/zip/CMS%20Catalogs/SOUSTRUZENI_ISCAR.pdf
18. DornerPramet, *Soustružení* [online]. Dormer Pramet, 399 s. [vid. 27.4.2015] Dostupné z www: <http://www.dormerpramet.com/downloads/turning-2014-cz-sk.pdf>
19. URDIAMANT s.r.o. *Brousicí kotouče z diamantu a kubického nitridu boru* [online]. © 2007, 81 s. [vid 2.5.2015]. Dostupné z www: <http://www.urdiamant.cz/wpimages/other/doc2/BK.pdf>
20. DIAMOND CONTRACT s.r.o. *Brousicí kotouče z diamantu a KNB – standartní řada*. [online] 2008-2009, 60 s. [vid. 25.4.2015]. Dostupné z www: <http://www.diamondcontact.cz/Katalogy/DC-Kat-A-2008-CZ.pdf>
21. VTN – Servis, s.r.o., Elbor – velmi tvrdé syntetické brusivo, [online], (c) 2004-2015. [vid. 20.4.2015]. Dostupné z www: <http://www.vtn.cz/brusne-nastroje-knb/index.php>
22. MM průmyslové spektrum: *Opracování obtížně obrobitelných dílů*. Praha: SEND předplatné s.r.o., 2002. ISSN 1212-2572. Kód článku: 020938. Dostupné z www: <http://www.mmspektrum.com/clanek/opracovani-obtizne-obrobitelnych-dilu.html>
23. MM Průmyslové spektrum: *Řezné nástroje současnosti*. Praha SEND předplatné s.r.o., 2002. ISSN 1212-2572. Kód článku: 020509. Dostupné z www: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-nastroje-soucasnosti-2.html>
24. MM Průmyslové spektrum: *Břítové destičky pro vysoce produktivní obrábění*. Praha SEND předplatné s.r.o., 2001. ISSN 1212-2572. Kód článku: 010448. Dostupné z www: <http://www.mmspektrum.com/clanek/britove-desticky-pro-vysoce-produktivni-obrabeni.html>

25. MÁDL, Jan. *Optimalizace při obrábění (řezné parametry)*. WEB Journal [online]. 1998 [vid. 9.5.2015]. Dostupné z www: <http://fstroj.utc.sk/journal/sk/013/013.htm>
26. MÁDL, Jan. *Manufacturing and industrial engineering: Integrita povrchu po obrábění* [online]. Prešov, Slovensko: Technical University of Košice – Faculty of Manufacturing Technologies, 2008 [vid. 20.5.2015]. ISBN 1335-7972. Dostupné z www: <http://www.fvt.tuke.sk/journal/pdf08/2-str-05-07.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

symbol	jednotka	význam
A_D	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
C_{Fc}	[-]	materiálová konstanta
C_{Ff}	[-]	materiálová konstanta
C_{Fp}	[-]	materiálová konstanta
D	[mm]	průměr obrobku
F	[N]	celková řezná síla
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
L	[mm]	dráha nástroje
P_m	[kW]	celkový výkon obráběcího stroje
Q_w	[mm.s ⁻¹]	rychlost odebrání materiálu
R_a	[μm]	střední aritmetická úchylka
R_p	[μm]	maximální výška výstupku profilu
R_t	[μm]	celková výška profilu
R_z	[μm]	maximální výška profilu
T	[°C]	teplota
ΔV_w	[mm ³]	objem materiálu odebraný za časový interval
a_e	[mm]	pracovní záběr
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
b_D	[mm]	jmenovitá šířka třísky (soustružení)
b_D	[mm]	šířka aktivní části broušícího kotouče (broušení)
b_s	[mm]	šířka broušícího kotouče
d	[mm]	průměr obrobené plochy
d_s	[mm]	průměr obráběcího kotouče
d_w	[mm]	průměr obrobku
f	[mm]	posuv na otáčku
f_a	[mm]	axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku
f_r	[mm]	radiální posuv stolu brusky na jeden axiální zdvih stolu
h_D	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
h_{eq}	[mm]	ekvivalentní tloušťka broušení
k_c	[MPa]	měrná řezná síla
l	[mm]	délka soustružené plochy

l_a	[mm]	dráha pohybu brusky v axiálním směru
l_g	[mm]	geometrická délka styku
l_k	[mm]	kinetická délka styku
l_n	[mm]	délka náběhu
l_{na}	[mm]	délka náběhu v axiálním směru
l_p	[mm]	délka přeběhu
l_{pa}	[mm]	délka přeběhu v axiálním směru
l_w	[mm]	délka obrobku
n	[min^{-1}]	otáčky obrobku
n_s	[min^{-1}]	frekvence otáčení brousícího kotouče
n_w	[min^{-1}]	frekvence otáčení obrobku
p	[mm]	přídavek na broušení
q	[-]	poměr rychlosti
r_{eq}	[mm]	ekvivalentní poloměr brousícího kotouče
r_s	[mm]	poloměr brousícího kotouče
r_w	[mm]	poloměr obrobku
t	[s]	čas
t_{AS}	[min]	jednotkový strojní čas
t_{ASn}	[min]	strojní čas obrábění konstantními otáčkami
t_{ASv}	[min]	strojní čas obrábění konstantní řeznou rychlostí
v_c	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	řezná rychlost (soustružení)
v_c	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	řezná rychlost (broušení)
v_e	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	rychlost řezného pohybu
v_f	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	posuvová rychlost
v_{fa}	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	axiální rychlost posuvu stolu brusky
v_w	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	obvodová rychlost obrobku
x_{Fc}	[-]	exponent vlivu a_p
x_{Ff}	[-]	exponent vlivu a_p
x_{Fp}	[-]	exponent vlivu a_p
y_{Fc}	[-]	exponent vlivu f
y_{Ff}	[-]	exponent vlivu f
y_{Fp}	[-]	exponent vlivu f
η	[-]	účinnost
K_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
π	[-]	Ludolfovo číslo

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

zkratka	význam zkratky
A	austenit
Al	hliník
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
AlN	nitrid hliníku
ARA	Anizometrický rozpad austenitu
C	uhlík
CNC	Computer Numeric Control
Co	kobalt
CoO	oxid kobaltnatý
Cr	chrom
CVD	Chemical Vapour Deposition
F	ferit
H ₂ SO ₄	kyselina sírová
HRC	tvrdost dle Rocwela
HSS	High speed steel
CH ₃ CN	acetonitril
KBN	Kubický nitrid boru
KNO ₃	dusičnan draselný
Mo	molibden
MT-CVD	Middle Temperature CVD
NaCl	chlorid sodný
NaNO ₃	dusičnan sodný
NaOH	hydroxid sodný
NbC	karbid niobu
NH ₃	amoniak
Ni	nikl
P	fosfor
P	perlit
PCVD	plazmaticky aktivovaná CVD metoda
PD	polykrystalický diamant
PKNB	polykrystalický nitrid boru
PVD	Physical Vapour Deposition

RO	rychlořezná ocel
S	síra
Si	křemík
SiC	karbid křemíku
SiN	nitrid křemíku
Si ₃ N ₄	nitrid křemičitý
SK	slinutý karbid
TaC	karbid tantalu
TiC	karbid titanu
TiCl ₄	chlorid titaničitý
TiCN	karbo-nitrid titanu
TiN	nitrid titanu
TiO	oxid titanatý
V	vanad
VBD	výměnná břitová destička
W	wolfram
WC	karbid wolframu
ZrO ₂	oxid zirkoničitý

