

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OBRÁBĚNÍ KALENÝCH OCELÍ NA CNC STROJÍCH

MACHINING OF HARDENED STEEL ON CNC MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Eliška Nováková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Eliška Nováková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Milan Kalivoda**
Akademický rok: 2015/16

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 bakalářské práce:

Obrábění kalených ocelí na CNC strojích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod (představení firmy, požadavky zákazníků).
2. Vlastnosti kalených ocelí a jejich obrobiteľnosť.
3. Obráběcí technologie využívané ve firmě.
4. Sortiment nástrojů pro osazování CNC strojů.
5. Návrh technologických postupů pro vytipované součásti.
6. Technicko-ekonomické posouzení návrhů v podmínkách firmy včetně ekologie.
7. Diskuze.
8. Závěr.

Cíle bakalářské práce:

Provedení návrhu technologických procesů s respektováním výhodných podmínek vůči zákazníkovi.

Seznam literatury:

Píška, M. et al. (2009): Speciální technologie obrábění. CERM, s. r. o., Brno.

Humár, A. (2008): Materiály pro řezné nástroje. MM publishing, s. r. o., Praha.

Ptáček, L. et al. (2003): Nauka o materiálu I. CERM, s. r. o., Brno.

Štulpa, M. (2007): CNC obráběcí stroje a jejich programování. Technická literatura BEN, Praha.

Kolektiv autorů. (1997): Příručka obrábění, kniha pro praktiky. Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., Praha.

Leiveber, J., Řasa, J. a Vávra, P. (2000): Strojnické tabulky. Scientia, s. r. o., Praha.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá tématem obrábění kalených ocelí na CNC strojích. V první části je popsána firma, ve které byl obráběn vytipovaný kalený dílec. Další část práce se zaměřuje na vlastnosti kalených ocelí a jejich obrobitelnost. Prostřední část práce uvádí základní obráběcí technologie využívané ve firmě a programování CNC strojů. Dále jsou popsány materiály řezných nástrojů pro obrábění kalených ocelí od vybraných výrobců. V závěru práce je popsáno obrábění vytipovaného kaleného dílce a je provedeno zhodnocení technologického postupu.

Klíčová slova

kalená ocel, obrábění, materiály pro řezné nástroje, CNC stroj

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the topic of machining of hardened steels on CNC machines. In the first part there is the description of the company, in which the particular hardened part was machined. The next part of the thesis focuses on properties of hardened steel and their suitability for machining. The middle part of the work states the basic machining technologies used in the company and programming of the CNC machines. Further there are described the materials of the cutting tools for machining of the steel from selected producers/ manufacturers. At the end of this thesis the machining of the particular hardened component is described, and the evaluation of the technology procedure is made.

Key words

hardened steel, machining, materials for cutting tools, CNC machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁKOVÁ, E. *Obrábění kalených ocelí na CNC strojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Obrábění kalených ocelí na CNC strojích** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Eliška Nováková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH	6
ÚVOD	8
1 PŘEDSTAVENÍ FIRMY	9
2 VLASTNOSTI KALENÝCH OCELÍ A JEJICH OBROBITELNOST	11
2.1 Základní terminologie	12
2.1.1 Kalitelnost	12
2.1.2 Zakalitelnost	12
2.1.3 Prokalitelnost	12
2.1.4 Jominiho zkouška (čelní zkouška prokalitelnosti)	13
2.2 Martenzitické kalení	15
2.3 Lomené kalení	15
2.4 Termální kalení	16
2.5 Kalení se zmrazováním	16
2.6 Izotermické bainitické kalení	16
2.7 Další způsoby kalení	17
2.8 Popouštění	18
2.9 Kalicí prostředí	18
2.10 Obrobitelnost kalených ocelí	19
3 OBRÁBĚCÍ TECHNOLOGIE VYUŽÍVANÉ VE FIRMĚ	24
3.1 Soustružení	24
3.2 Frézování	24
3.3 Vrtání	25
3.4 Broušení	25
4 PROGRAMOVÁNÍ CNC STROJŮ	26
4.1 Základní definice a principy	26
4.2 Úvod do programování CNC strojů	27
5 SORTIMENT NÁSTROJŮ PRO OSAZOVÁNÍ CNC STROJŮ	30
5.1 Sortiment nástrojů pro soustružení	30
5.2 Sortiment nástrojů pro frézování	33
5.3 Sortiment nástrojů pro vrtání	35
5.4 Sortiment nástrojů pro broušení	37

6 OBRÁBĚNÍ KALENÉHO DÍLCE	39
6.1 Materiál	39
6.2 Stroj	41
6.3 Nástroje	42
6.4 Technologický postup	43
7 ZHODNOCENÍ NÁVRHU TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU V PODMÍNKÁCH FIRMY.....	44
7.1 Ekologie	45
8 DISKUSE	46
8.1 Materiály pro řezné nástroje	46
8.2 Obrábění kaleného dílce KLOUB	46
ZÁVĚR	47
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	48
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	54
SEZNAM PŘÍLOH.....	56

ÚVOD

Třískové obrábění kalených ocelí lze zařadit do problematiky obrábění těžkoobrobitelných materiálů.

V současné době už neplatí tvrzení, že broušení je jediná vhodná metoda pro obrábění kalených ocelí. Existují nástroje pro všechny základní metody třískového obrábění – soustružení, frézování, vrtání i broušení.

Stále se zvyšující požadavky na kvalitu povrchu, spolehlivost a životnost nástroje, přesnost metody obrábění, produktivitu technologického procesu apod., vedou k vývoji nástrojů, strojů a technologií efektivně použitelných pro obrábění kalených ocelí.

Pro obrábění kalených ocelí jsou používány nástroje z moderních řezných materiálů, jako jsou slinuté karbidy, řezná keramika a supertvrdé materiály, jako je kubický nitrid bóru. Jsou zde zastoupeny obě základní technologie nanášení povlaků - PVD a CVD, a i speciální technologie (např. MT-CVD). Výrobci nástrojů věnují pozornost také geometrii nástrojů a speciální geometrie nástrojů určených pro těžkoobrobitelné materiály nejsou v katalogích výrobců výjimkou.

Vývoj příp. inovace materiálů, geometrií a povlaků pro řezné nástroje vede k vytvoření poměrně širokého sortimentu nástrojů, ze kterého může zákazník volit nejen nástroje pro dokončovací operace, ale i pro hrubovací operace.

Postup výroby dílce z kaleného materiálu musí být navržen s ohledem na jeho požadovanou tvrdost. Efektivnost technologie obrábění je ovlivněna výběrem vhodného nástroje a stroje, řezných podmínek, volbou použití chladicí kapaliny apod.

Úvodní kapitoly práce jsou věnovány způsobům kalení a technologiím tepelného zpracování, jejich charakteristice a výhodám, nevýhodám. Pozornost je věnována také základní terminologii tepelného procesu a obrobitelnosti kalených ocelí.

Prostřední část přibližuje čtyři nejdůležitější metody třískového obrábění prováděné ve vybrané firmě a je doplněna o stručnou charakteristiku NC programování.

V poslední části práce jsou z katalogů výrobců nástrojů (např. Sandvik Coromant, Dormer Pramet, WNT) vybrány materiály pro nástroje vhodné k obrábění kalených ocelí a je popsáno obrábění vytipovaného kaleného dílce včetně zhodnocení technologického postupu

1 PŘEDSTAVENÍ FIRMY

Vybraná česká strojírenská firma je od roku 1992 dodavatelem přesně obráběných dílů, montážních podskupin a průmyslových zařízení. Firma se specializuje na obrábění technicky náročných dílů do hmotnosti cca. 40 kg¹.

Technologický park je vybaven CNC stroji (CNC soustruhy, CNC obráběcí centra, CNC brusky na rovinné a rotační broušení) a vybavením pro klasické technologie jako je soustružení, frézování, broušení, vrtání, řezání. Firma má dlouhodobé zkušenosti v obrábění a obrábí všechny druhy materiálů používaných ve strojírenství včetně těžkoobrobitelných materiálů¹.

Velikost výrobní dávky se obvykle pohybuje ve stovkách kusů (tab. 1.1). Firma je schopná vyrábět dílce i v menších dávkách, naopak neumožňuje výrobu velkých sérií (> 10 000 ks.dávka⁻¹)¹.

Tab. 1.1 Přehled výrobních možností vybrané firmy¹.

Velikost výrobní dávky [ks·dávka ⁻¹]			
5-10	100	1000	2000
Velikost obráběných dílců Hmotnost [kg]			
0,1		30 – 40	
Rozměry - soustružení D [mm]			
5 – 10		400	
Rozměry – frézování L [mm]			
10 – 1000			

Kontrolní i výrobní procesy jsou certifikovány dle normy ISO 9001 a jsou pravidelně ověřovány při auditech. Dále je firma certifikována dle normy ISO 14001, což je certifikace systému environmentálního managementu¹.

Průběh výroby je řízen informačním systémem (ERP) s implementovaným pokročilým plánováním výrobních kapacit (APS). Systém generuje požadavky na dodání materiálu a termíny zahájení jednotlivých výrobních operací tak, aby byl dodržen požadovaný termín vyrobení dílů a jejich expedice¹.

Firma nemá vlastní výrobní program (chybí konstrukční příprava výroby) a vyrábí dílce na základě dodaných výkresů¹.

Zákazník vytvoří poptávku u obchodního oddělení. Součástí poptávky je technický výkres součásti, počet kusů, příp. materiál, apod. Pracovník obchodního oddělení pověřený tvorbou cenových nabídek zhodnotí poptávku z hlediska vyrobitelnosti (požadovaná přesnost, střední aritmetická úchylnost profilu Ra, technologie,...), efektivnosti a ekonomičnosti výroby. Výstupem obchodního oddělení je cenový návrh

(včetně předpokladů nákupu speciálního nářadí nebo nástrojů). Cenový návrh je následně poslán zákazníkovi k souhlasu s výrobou. Pokud zákazník s cenovým návrhem souhlasí, je zakázka zařazena do výroby.

2 VLASTNOSTI KALENÝCH OCELÍ A JEJICH OBROBITELNOST

Kalení je tepelné zpracování skládající se z ohřevu na kalicí (austenitizační) teplotu (obr. 2.1), výdrže na této teplotě a z ochlazování nadkritickou rychlostí¹⁰. Kalicí teploty se volí u podeutektoidních ocelí 30 °C až 50 °C nad A_{c3} a u nadeutektoidních ocelí 30 °C až 50 °C nad A_{c1} (obr. 2.1, tab. 2.1). Cílem kalení je zvýšení tvrdosti oceli³. Při procesu kalení vzniká buď struktura martenzitická, nebo bainitická (tab. 2.2)¹¹.

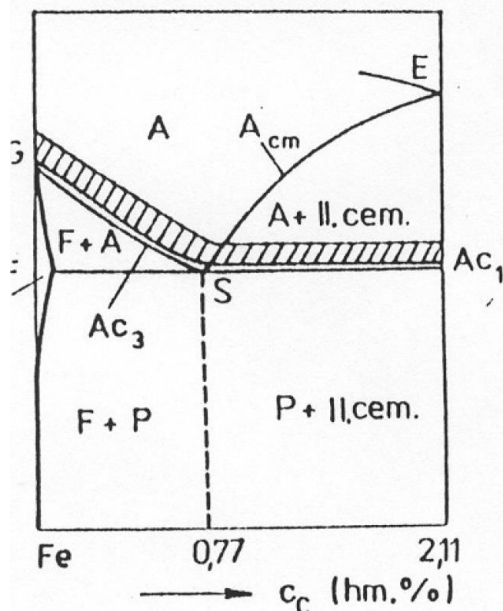
V příloze 1 je vysvětlen rozdíl mezi označením teplot A_c a A_r . V příloze 2 jsou podrobněji vysvětlené vybrané pojmy z oblasti tepelného zpracování ocelí.

Tab. 2.1 Základní charakteristika kalených ocelí^{3,5,53,60,72}.

Obsah uhlíku před kalením	Více než 0,2 %C
Výsledná struktura	Martenzitická nebo bainitická
Kalicí teploty	30 °C až 50 °C nad A_{c1} nebo A_{c3}
Tvrдость	45 HRC – 65 (70) HRC
Měrná řezná síla k_{c1}	2550 - 5000 N·mm ⁻²

Tab. 2.2 Základní rozdělení nejčastějších způsobů kalení¹⁰.

Základní způsob kalení	Dělení	Další dělení
Martenzitické	Nepřetržité	
	Přetržité	Lomené
		Termální
		Kalení se zmrazováním
Bainitické	Nepřetržité	
	Izotermické (přetržité)	Zušlechťování
		Kalení
Kalení pod lisem		
Indukční kalení		
Dvojitý kalení		

Obr. 2.1 Pásmo vhodných kalicích teplot v diagramu Fe-Fe₃C¹¹.

2.1 Základní terminologie

2.1.1 Kalitelnost

Kalitelnost je schopnost oceli dosáhnout vyšší tvrdosti pomocí tepelného zpracování – kalení³. Nejvyšší dosažitelnou tvrdost oceli po kalení ovlivňuje především na obsah uhlíku². Při nízkém obsahu uhlíku nelze dosáhnout vysoké tvrdosti³.

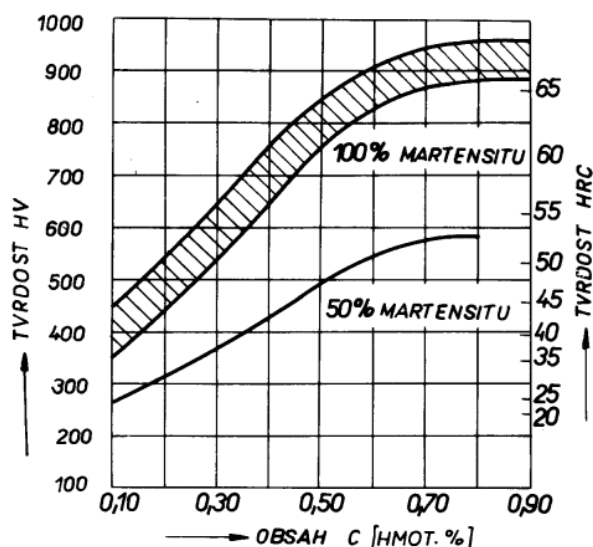
Nelegované oceli obsahující více než 0,35 % uhlíku se považují za dobře kalitelné a nelegované oceli obsahující méně než 0,2 % uhlíku se považují za nezakalitelné⁵. U legovaných ocelí se hranice obsahu uhlíku posouvá k nižším hodnotám².

2.1.2 Zakalitelnost

Zakalitelnost je schopnost materiálu při ochlazování nadkritickou rychlostí přejít do metastabilního stavu a setrvat v něm. Je dána nejvyšší dosažitelnou tvrdostí kalené oceli⁴.

2.1.3 Prokalitelnost

Prokalitelnost oceli je schopnost dosažení tvrdosti oceli do určité hloubky pod povrch výrobku¹⁰. Vrstva, která má tvrdost odpovídající struktuře s minimálně 50 % martenzitu, se považuje za prokalenou (obr. 2.2)¹⁰. Prokalitelnost se zjišťuje normalizovanou čelní zkouškou prokalitelnosti (ČSN 42 0447). Není proto nutné zjišťovat křivku ARA pro každou tavbu a kontrolovat, zda odpovídá normou předepsané prokalitelnosti³.



Obr. 2.2 Vliv uhlíku na tvrdost martenzitu a struktury s 50 % martenzitu¹⁰.

Vnitřní činitele ovlivňující prokalitelnost⁴:

- chemické složení austenitu – obsah uhlíku a legujících prvků,
- homogenita austenitu – stupeň koncentrace rozpuštěného uhlíku, ostatních prvků a množství nerozpuštěných částí karbidů v okamžiku kalení,
- velikost austenitického zrna – čím jemnější zrna, tím vyšší kritická rychlost a naopak.

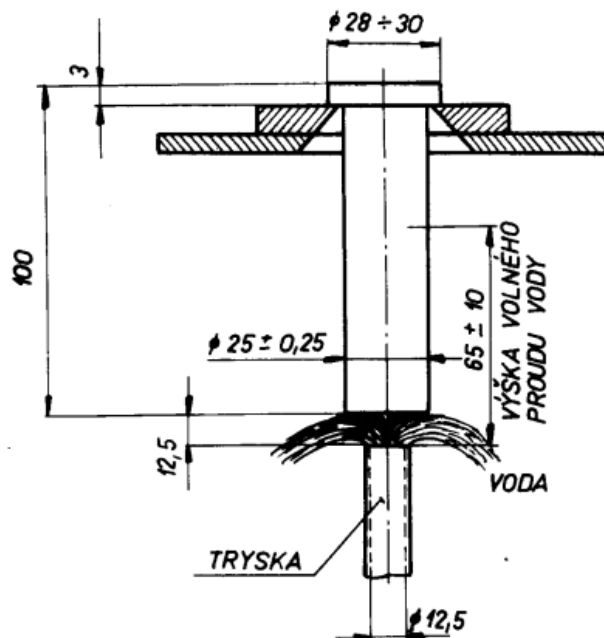
Vnější činitele ovlivňující prokalitelnost⁴:

- kalicí teplota,
- doba výdrže na kalicí teplotě,
- ochlazovací prostředí,
- stav povrchu oceli,
- tvar a rozměr kaleného výrobku.

2.1.4 Jominiho zkouška (čelní zkouška prokalitelnosti)

Váleček normovaného tvaru se zahřeje na kalicí teplotu. Následuje výdrž 30 minut na této teplotě a vložení do kalicího přípravku. Přesun mezi pecí a přípravkem musí být maximálně 5 s¹⁰. Otevře se rychlouzavírací kohout trubky s přívodem vody o teplotě 15 ± 10 °C, která tryská na čelo válečku^{6,10}. Výška proudu vody a vnitřní průměr trysky je znázorněn na obrázku 2.3. Váleček v přípravku zůstane až do vychladnutí (minimálně 10 minut)¹⁰.

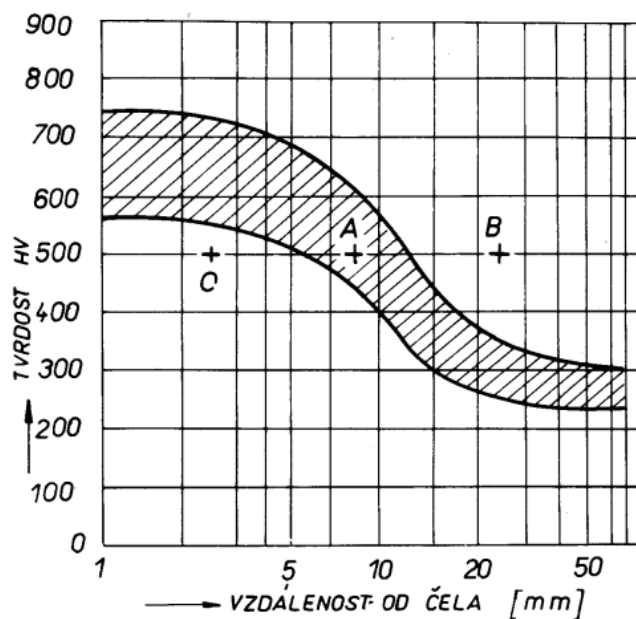
Po vychladnutí se váleček vyjme z přípravku a na dvou protilehlých stranách povrchu válečku se vybrousí do hloubky $0,50 \pm 0,10$ mm¹⁰ po jeho celé délce dvě pásma. Na obroušené ploše se pomocí tvrdoměru v předepsaných vzdálenostech měří tvrdost. Závislost tvrdosti na vzdálenosti od kaleného čela zkoušky tvoří tzv. křivku prokalitelnosti, která reprezentuje prokalitelnost dané oceli⁶.



Obr. 2.3 Čelní zkouška prokalitelnosti¹⁰.

Index prokalitelnosti J se používá ke srovnání různých ocelí a udává vzdálenost od ochlazovaného čela Jominiho zkoušky. Např. J35 - 15 znamená, že ve vzdálenosti 15 mm od čela Jominiho zkoušky musí být tvrdost 35 HRC¹⁰.

Zkoušku prokalitelnosti je nutné několikrát opakovat. Minimální a maximální naměřené hodnoty tvrdosti vymezují tzv. **pás prokalitelnosti** (obr. 2.4). Chemické složení každé oceli je limitováno určitými hranicemi, proto není prokalitelnost ocelí různých taveb téhož materiálového listu stejná¹⁰.

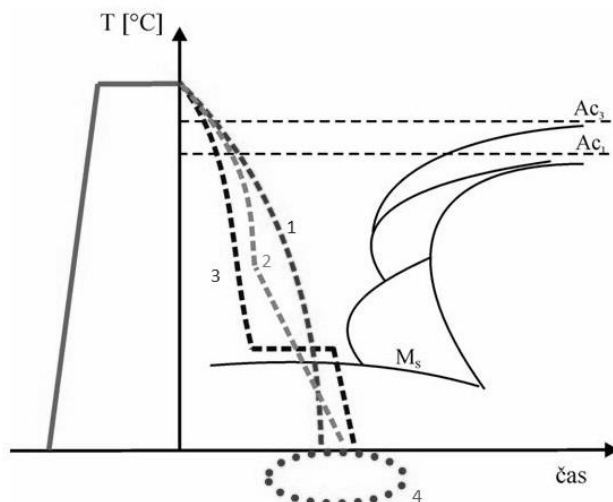


Obr. 2.4 Pás prokalitelnosti oceli ČSN 14 240¹⁰.

2.2 Martenzitické kalení

Nepřetržitě martenzitické kalení patří mezi nejjednodušší způsoby kalení¹¹ používané k dosažení vysoké tvrdosti a pevnosti ocelí⁸. Jedná se o anizotermickou transformaci, která je znázorněná v diagramu ARA (obr. 2.5 křivka 1)¹². Nepřetržitě martenzitické kalení je někdy označováno jako přímé kalení nebo neutrální kalení^{8,18}.

Mezi výhody martenzitického kalení patří vysoká pevnost a houževnatost u dílů vystavených vysoké zátěži⁸. Nevýhodou tohoto způsobu kalení je vznik velkého tepelného pnutí a deformace, a proto je pro kalení tvarově složitějších dílců často nevhodný¹⁰.



Obr. 2.5 ARA diagram – kalení nepřetržitě (1), kalení lomené (2), kalení termální (3), kalení zmrazením (4)¹³.

Technologie martenzitického kalení:

1. Zahřátí na kalicí teplotu, při teplotě mezi 730 °C a 900 °C (záleží na typu oceli) probíhá transformace mikrostruktury na austenit⁸.
2. Výdrž na kalicí teplotě pro dosažení homogenního austenitu při rovnoměrném prohřátí⁸.
3. Plynulé (nepřetržitě) ochlazení z kalicí teploty do studeného prostředí¹¹ (voda, roztavená sůl, olej, dusík pod vysokým tlakem)⁸.

2.3 Lomené kalení

Účelem martenzitického (přetržitě) lomeného kalení (obr. 2.5 křivka 2) je zmenšení ochlazovací rychlosti v průběhu přeměny austenitu na martenzit a snížení rizika vzniku tepelných a strukturních pnutí¹¹. Je nutné znát ARA diagramy příslušných ocelí, protože ochlazovací křivka musí minout bainitickou oblast¹⁰. Tento způsob kalení se například používá u některých tvarově složitých dílců, které vyžadují rychlé ochlazení a při nepřetržitěm ochlazování v intenzivnějším prostředí (ve vodě nebo v oleji) praskají¹¹. Nevýhodou lomeného kalení může být obtížné měření teploty dosažené v prvním ochlazovacím prostředí.

Technologie lomeného kalení:

1. Zahřátí na kalicí teplotu¹¹.
2. Výdrž na kalicí teplotě - přeměna mikrostruktury na austenit při rovnoměrném prohřátí⁸.

3. Ochlazování nadkritickou rychlostí v „tvrdším“ ochlazovacím prostředí (tj. prostředí s větší ochlazovací rychlostí, např. ve vodě)^{10,11}.
4. Ochlazování v prostředí s menší ochlazovací rychlostí (např. v oleji)^{10,11}.

2.4 Termální kalení

Termální kalení se používá pro oddělení tepelných a strukturních pnutí a zmenšení tak jejich společného účinku¹¹. Tento způsob přerušovaného kalení probíhá nejčastěji v lázni roztavené soli při teplotě těsně nad M_s ⁸ (obr. 2.5 křivka 3) u ocelí, které mají bainitickou oblast posunutou dostatečně vpravo¹⁰. Cílem je vyrovnání teploty celého obrobku, proto se termální kalení provádí nejčastěji u tenkostěnných dílů, dále pak u obrobků se složitou geometrií, změnami průřezu a různými hmotnostmi. Tím je minimalizována tvorba trhlin, deformace a zbytkového pnutí⁸.

Technologie termálního kalení

1. Zahřátí na kalicí teplotu¹⁰.
2. Kalení nadkritickou rychlostí v horkém kapalném médiu o teplotě těsně nad M_s ⁸.
3. Výdrž na teplotě nad M_s až do dosažení homogenní teploty v celém objemu dílce^{8,10}.
4. Pokles teploty tak, aby ochlazovací křivka prořala čáru M_s ¹⁰.
5. Popouštění (kap. 2.8)⁸.

2.5 Kalení se zmrazováním

Kalení se zmrazováním je ochlazování kalených dílců na teplotu pod bodem mrazu (obr. 2.5 křivka 4). Zmrazování probíhá ihned po kalení před popouštěním¹⁴. Účelem zmrazování kalené oceli je snížit podíl zbytkového austenitu, který zůstává ve struktuře spolu s martenzitem a tím zvýšit její tvrdost¹¹. Dalším důvodem zmrazování je stabilizace rozměrů. Při normální teplotě (i v průběhu několika let) probíhá pozvolná přeměna austenitu v martenzit, která je provázána objemovými změnami. Tyto změny zvyšují vnitřní pnutí, způsobují deformace a změny rozměrů, které jsou nežádoucí hlavně u nástrojů a přesných měřidel¹⁴.

Po kalení v předepsaném kalicím médiu následuje kalení se zmrazováním¹¹. Interval mezi nimi musí být co nejkratší, jinak dochází k stabilizaci austenitu¹⁰, která ztěžuje jeho přeměnu při dalším zpracování pod bodem mrazu¹⁴. Pro zmrazování se používá jako ochlazovací medium směs oxidu uhličitého s lihem nebo acetonem v chladících skříních a lze dosáhnout teploty kolem -78 °C . Nejnižší teploty lze dosáhnout například v lázních s tekutým vzduchem (-183 °C) nebo dusíkem (-196 °C)¹⁴.

2.6 Izotermické bainitické kalení

Izotermické bainitické kalení se řídí podle IRA digramů. IRA diagramy popisují transformaci austenitu na bainit za izotermických podmínek při různých rychlostech ochlazování^{10,12}.

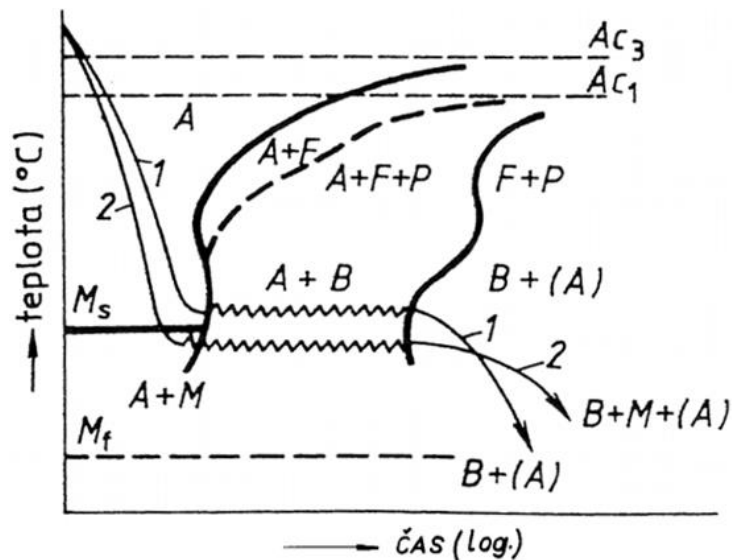
Bainitická struktura má ve srovnání s martenzitickou strukturou výrazně vyšší houževnatost, naopak nemá tak vysokou tvrdost. Izotermické bainitické kalení minimalizuje zbytková pnutí, deformace a nebezpečí vzniku trhlin^{10,11}.

Nejčastějším ochlazovacím médiem je solná lázeň⁸, která má vysokou ochlazovací schopnost a zabraňuje tak rozpadu austenitu na perlit¹¹. Tento proces

kalení se používá zejména pro tenké díly z uhlíkaté oceli vyžadující mimořádnou houževnatost, např. v automobilovém průmyslu^{8,10}.

Izotermické bainitické kalení se dělí podle teploty, při které se austenit přeměňuje na bainit¹¹:

1. *Izotermické zušlechťování* (obr. 2.6 křivka 1) je kalení v lázni, jejíž teplota je v oblasti přeměny austenitu na horní bainit (350 °C až 400 °C). V lázni setrvá předmět do ukončení bainitické transformace. Následuje ochlazení na vzduchu. Izotermicky zušlechťená ocel se zpravidla nepopouští^{14,11}.
2. *Izotermické kalení* (obr. 2.6 křivka 2) spočívá v ochlazení v lázni s teplotou těsně pod M_s ¹¹. Vzniká směs bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu¹⁴. Vzhledem k přítomnosti určitého podílu martenzitu vedle bainitu se izotermicky kalená ocel obvykle popouští¹⁵.



Obr. 2.6 IRA diagram – izotermické zušlechťování (1), izotermické kalení (2)⁹.

Technologie izotermického bainitického kalení

1. Zahřátí na izotermickou kalicí teplotu – probíhá austenitizace¹¹.
2. Ochlazení nadkritickou rychlostí¹¹.
3. Kalení v lázni v oblasti teplot přeměny austenitu na bainit⁸.
4. Ochlazení na pokojovou teplotu⁸.
5. Popouštění (ne u izotermického zušlechťování)¹¹.

2.7 Další způsoby kalení

Kalení pod lisem umožňuje dobré řízení rozměrů a homogenní kalení. Během procesu kalení je zachovávan tvar kruhových nebo plochých obrobků pomocí řízené síly lisu a formy na kalení⁸.

Indukční kalení patří mezi způsoby povrchového kalení. Používá se ke zvýšení pevnosti konkrétní oblasti součásti⁸. Výhodou je regulace hloubky zakalení, kterou lze dosáhnout tvrdého povrchu a měkkého jádra materiálu¹⁶. Díly jsou zahřáty působením střední nebo vysoké frekvence induktoru. Na povrchu kaleného předmětu se indukuje za působení střídavého proudu střídavé magnetické pole a vznikají vířivé proudy. Tím se ohřeje povrch tělesa na kalicí teplotu a předmět je následně ochlazen proudem kalicí emulze¹⁷.

Dvojitá kalení se zařazuje mezi tepelná zpracování cementovaných součástí. Po cementaci se součást nechá vychladnout na určitou teplotu¹⁹. Potom se provede ohřev na teplotu těsně nad A_{c3} ²⁰. Po zakalení získává materiál jemnější zrna. Následuje druhé kalení a to z teplot vhodných pro kalení vrstvy (teplota nad A_{c1}). Po druhém kalení získá cementovaná vrstva povrchu materiálu jemný martenzit^{11,19}. Někdy se proces dvojího kalení skládá nejprve ze žhání a následného tvrzení⁸. Po kalení následuje nízkoteplotní popouštění při teplotách 150 °C až 200 °C, které sníží napětí a součást tvarově stabilizuje. Tvrdost povrchové vrstvy se pohybuje okolo 58 HRC až 62 HRC. Výhodou je jemné zrna jádra a velká povrchová tvrdost²⁰.

2.8 Popouštění

Popouštění je proces tepelného zpracování a zpravidla probíhá ihned po kalení²⁰. Snižuje tvrdost a křehkost materiálu a zvyšuje jeho houževnatost⁸. Nejprve se provede ohřev kaleného materiálu na teplotu těsně pod A_{c1} , poté následuje výdrž na této teplotě k vytvoření struktur bližších k rovnovážnému stavu oceli s martenzitickou nebo bainitickou strukturou. Dojde k rozpadu nerovnovážné struktury martenzitu a k přeměně zbytkového austenitu. Ochlazení na teplotu okolí probíhá vhodným způsobem pro danou ocel¹¹.

Velikost popouštěcí teploty přímo ovlivňuje změny struktury a z nich vyplývající změny mechanických vlastností. Čím vyšší bude popouštěcí teplota, tím menší bude tvrdost, pevnost a mez kluzu a naopak plasticita a houževnatost se bude zvyšovat¹¹.

Některé typy ocelí se vyznačují náchylností k popouštěcí křehkosti⁸. Popouštěcí křehkost je pokles vrubové houževnatosti v okolí teplot 300 °C až 500 °C. Rozlišujeme dva druhy popouštěcí křehkosti: nízkoteplotní (250 - 400 °C) a vysokoteplotní (v okolí teploty 550 °C)¹¹.

Podle výše popouštěcí teploty se dělí popouštění na dvě skupiny¹¹:

1. *Popouštění při nízkých teplotách* – cílem je snížení vnitřních prnutí po kalení, zvýšení vrubové houževnatosti, zmenšení množství zbytkového austenitu¹¹. Teplota ohřevu se pohybuje mezi 160 °C až 300 °C⁸ (350 °C)¹¹, a je často používána pro cementované dílce a za studena tvářené nástrojové oceli. Požadována tvrdost je nejčastěji kolem 60 HRC⁸.
2. *Popouštění při vysokých teplotách* – cílem je získání vysoké houževnatosti při vysoké mezi kluzu a mezi únavy¹¹. Při popouštění nad 500 °C⁸ (550 °C)¹¹ probíhá překrytalizace martenzitu na sorbit¹⁰, což je pevná a houževnatá feriticko-cementitická struktura¹¹. Tento druh popouštění se nejčastěji používá pro kalené oceli, za tepla tvářené nástrojové oceli a rychlořezné oceli. Tvrdost se pohybuje kolem 65 HRC v závislosti na materiálu⁸.

2.9 Kalicí prostředí

Mezi faktory, které ovlivňují dosažení požadovaných vlastností kalených ocelí, patří mimo jiné i druh kalicího prostředí. Při kalení ocelí je třeba zvolit takové ochlazovací prostředí, aby ochlazovací křivka povrchu i jádra minula křivku počátku difúzního rozpadu austenitu¹⁰. Tuto podmínku můžeme splnit pouze v případě, známe-li chemické složení oceli a k tomu zvolíme optimální ochlazovací prostředí podle požadované tvrdosti^{11,22}. V následujících odstavcích jsou popsány základní druhy ochlazovacích prostředí pro kalení ocelí.

Vzduch je nejmírnější ochlazovací prostředím²². Protože je ochlazování pomalé, musí být ARA diagram posunut dostatečně vpravo. Proto se vzduch používá pro oceli legované prvky, které zvyšují její prokalitelnost. Takové oceli se nazývají samokalitelné^{10,11}.

Olej je nejrozšířenější kalicí prostředek²² a ochlazuje intenzivněji než vzduch¹⁰. Olejové lázně bývají vybavené nucenou cirkulací, kvůli zamezení místního přehřátí a degradaci oleje¹¹. Teplota oleje pohybující se v povoleném rozmezí (kolem 50 °C), výrazně neovlivňuje rychlost ochlazování²². Pokud je prováděno ruční kalení v klidném oleji, je nutné dílcem v lázni pohybovat, aby došlo k odstranění páry a zabránění vzniku tzv. měkkých míst s nižší tvrdostí¹⁰. Dále je nutné odsávat páru, vzniklou odpařováním oleje při kalení¹¹.

Nejčastěji se používají oleje minerální, které jsou vyrobeny z ropy rafinací a jsou tvořeny směsí uhlovodíků. Minerální oleje existují v široké škále viskozitních olejů, od nafty s nejnižší viskozitou po těžký válcový olej s nejvyšší viskozitou¹⁴.

Voda je nejintenzivnější ochlazovací prostředím²². Největší rozdíl teplot mezi povrchem a středem součásti je u kalení do vody, proto je zde oproti kalení do oleje a na vzduchu velké riziko vzniku trhlin a deformací¹¹. Vodní lázeň je nehořlavá, levná, nenáročná a okuje na dílcích snadno odprýskají¹⁰. Kolem ochlazovaného výrobku se tvoří vrstva páry, kterou je třeba stále narušovat relativním pohybem výrobku a vodní lázně¹¹. Při zvýšení teploty vodní lázně nad 30 °C se její ochlazovací intenzita značně snižuje, což je nežádoucí¹⁰. Se zvyšující se teplotou vody klesá hloubka prokalení a nedochází k odpovídajícímu snížení vnitřních pnutí, nebezpečí deformací a vzniku trhlin¹¹.

Intenzitu ochlazování ve vodě lze zvýšit buď pohybem vodní lázně nebo přísadami soli (NaCl, NaNO₃) nebo louhu (NaOH). Přísady prudce zvyšují rychlost ochlazování v oblasti perlitické přeměny a snižují rychlost ochlazování v oblastech pod teplotou 200 °C. Intenzitu ochlazování lze snížit přísadami, jako jsou glycerin, vodní sklo, mýdlo, emulze oleje. Solných lázní se jako ochlazovacího prostředku často používá při termálním kalení (drobné a tvarově složité díly z legovaných ocelí)^{11,14}.

Polymerní roztoky lze svým ochlazovacím účinkem zařadit mezi ochlazování vodou a olejem²². Principem polymerních roztoků je vytvoření ochranné izolační vrstvy, která snižuje rychlost ochlazování součásti v porovnání s vodou. Po ochlazení se ochranná vrstva rozpustí, a proto povrch součásti zůstává čistý²². Nevzniká olejová pára ani kouř. Polymerní roztok není hořlavý, snižuje zdravotní riziko, jeho ochlazovací schopnost lze měnit v závislosti na koncentraci, teplotě a rychlosti proudění^{11,22}. Polymery používané pro kalení mohou být např.: polymery na bázi polyalkylenglykolu (PAG), polyvinylalkoholů (PVA), polyvinylpyrrolidonu (PVP)^{11,21}.

2.10 Obrobitelnost kalených ocelí

Obrobitelnost = technologická vlastnost materiálu obrobku, která určuje snadnost či obtížnost obrábění²⁴.

= schopnost materiálu být obráběn²⁹.

Obrobitelnost závisí na mnoha faktorech, ty nejdůležitější jsou uvedeny v následujících bodech^{25,29}:

- řezné podmínky,
- tepelné zpracování materiálu,
- životnost nástroje,

- opotřebenění nástroje,
- utváření a odvod třísky,
- kvalita povrchu při standardizovaných řezných podmínkách,
- sklon k vytváření nárůstku,
- minimální řezné síly,
- index obrobiteľnosti (příloha 3),
- upnutí nástroje,
- teplota,
- výkon.

Stroje

Důležitým kritériem je výběr vhodného stroje, který by měl mít dostatečný výkon, měl by být dostatečně tuhý a měl by být schopen tlumit vibrace. Upínač obrobku a upínač nástroje by měl vykazovat dostatečnou stabilitu²⁶. Diagram stability stroje slouží k zajištění stabilního obrábění (příloha 4). Díky němu lze nastavit správné otáčky a šířku záběru ostří, a zabránit tak kmitání při obrábění⁵². Pro eliminaci vnitřních i vnějších zdrojů tepla by měl mít stroj účinný odvod třísek a výkonné chlazení. Sofistikovaný CAD/CAM software je předpokladem pro plynulé a efektivní obrábění a pro vysokou produktivitu²⁶.

Nástroje

Při obrábění kalených ocelí je důležité zvolit optimální nástroj, který zaručuje vysokou produktivitu, požadovanou trvanlivost a spolehlivost. Řezná část nástroje by měla být dostatečně odolná proti namáhání při vysokých teplotách a vzniku plastické deformace. Dále by měla odolávat abrazivnímu opotřebenění i chemické reakci mezi třískou a řezným materiálem²⁶. Nástroj by měl správně utvářet třísku a tím redukovat zatížení ostří²⁷.

Nástroje zvolené pro obrábění kalených ocelí patří mezi nástroje vhodné pro obrábění skupiny H (tab. 2.3)⁴².

Tab. 2.3 Použití a klasifikace tvrdých materiálů pro řezné nástroje dle ČSN ISO 513⁷⁹.

Skupiny použití			Podskupiny použití			
Identifikační písmeno	Identifikační barva	Obráběný materiál	Tvrdé řezné materiály		-	
H	šedá	Tvrde materiály: kalená ocel, kalené litinové materiály, tvrzená litina.	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	↑ ^a	↓ ^b
^a Zvyšování rychlosti, zvyšování oteruvzdornosti materiálu pro řezné nástroje. ^b Zvyšování posuvu, zvyšování houževnatosti řezného materiálu.						

Materiály pro řezné nástroje

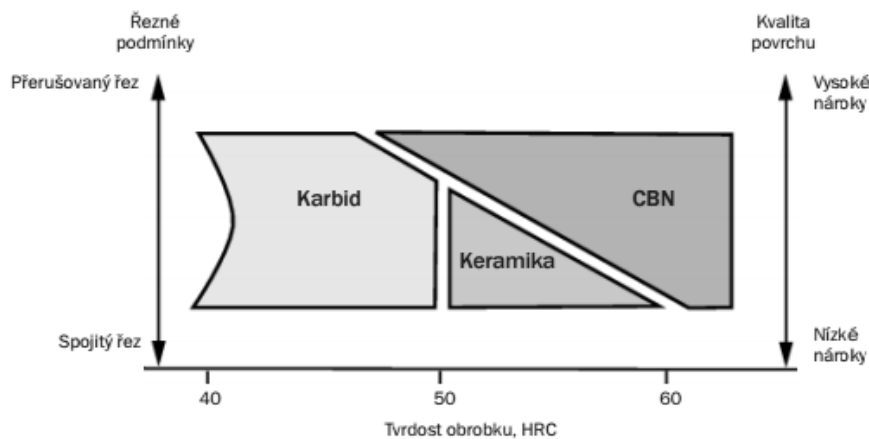
Materiály pro řezné nástroje vhodné k obrábění kalené oceli jsou především: slinutý karbid, řezná keramika a polykrystalický kubický nitrid boru⁵³. Tyto materiály jsou ve většině případů opatřené povlakem.

Slinuté karbidy (SK) jsou vyráběny práškovou metalurgií⁵³. Základním karbidem pro výrobu všech druhů SK je karbid wolframu (WC). Pojivem je kobalt (Co) a další složky, např.: karbid titanu, tantalu, niobu³⁴. Skupina použití **H** je rozdělená

do podskupin použití: H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30⁷⁹. Obsah pojícího kovu je vyjádřen číslem u písmene podskupiny (např. H05 znamená nízký obsah pojícího kovu)³⁴. S rostoucím číslem podskupiny se mění vlastnosti a doporučené řezné podmínky (tabulka 2.3). Oblast použití slinutých karbidů pro soustružení je na obrázku 2.7.

Nástroje z kubického nitridu bóru (anglická zkratka: CBN nebo česká: PKNB, KNB) jsou schopné odolávat vysokým řezným teplotám a zároveň si uchovávat ostrost břitu. Lze je použít při vysokých řezných rychlostech. Díky těmto vlastnostem mají nástroje z CBN dlouhou životnost a umožňují dosažení velmi dobré kvality obrobené plochy³⁵.

Řezná keramika je nástrojový materiál, který má vysokou odolnost proti otěru při použití vysokých řezných rychlostí. Pro obrábění kalených ocelí lze použít nástroje ze smíšené keramiky (CM) nebo keramiky vyztužené vlákny (Whiskery)⁵³.



Obr. 2.7 Soustružení tvrzených součástí a použití řezných materiálů⁵⁹.

Povlak

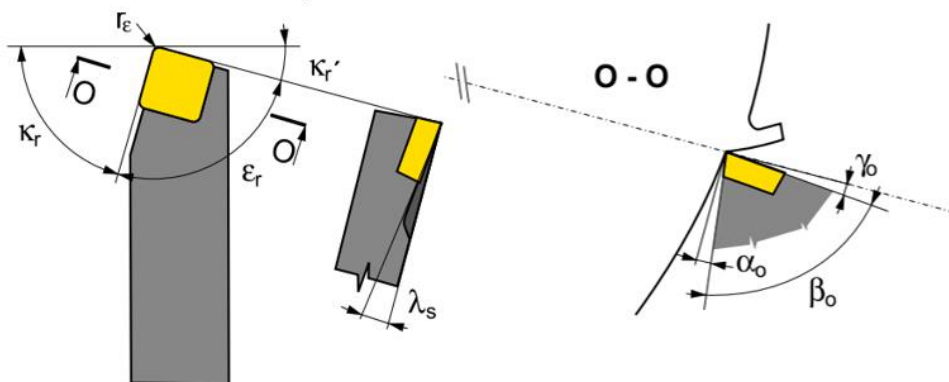
Metody nanášení povlaků se dělí na PVD a CVD, popř. MT-CVD³⁴. Metoda PVD (Physical Vapor Deposition – fyzikální napařování) je charakteristická nízkými pracovními teplotami (150 °C až 500 °C)³⁴ a spočívá v odpaření nebo odprášení pevné látky v řízené atmosféře³³. Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování z plynné fáze) probíhá za vysokých teplot (1 000 °C až 11 200 °C)³⁴. Jedná se o proces, při kterém povlak vzniká chemickými reakcemi⁵³. Mezi nové metody povlakování můžeme zařadit technologii MT-CVD (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition). Tato metoda na rozdíl od konvenční CVD technologie probíhá za nižších teplot (700 - 850 °C)³⁴.

V současnosti je každoročně vyvíjeno mnoho druhů povlaků a povlakovaných materiálů v souvislosti s požadavky zákazníka, s rostoucím rozvojem výrobních systémů, řezných nástrojů apod³⁴. Je snaha vytvářet substráty s úpravou chemického složení, zrnitosti a metody slinování, např. vytváření funkčně gradientních vrstev na základním SK³³. Typy povlaků jsou např.: vícevrstvé (multivrstvé) povlaky, monovrstvé povlaky, nanokompozitní povlaky, gradientní vrstvy, TripleCoatings.

Geometrie nástroje

Při obrábění kalených ocelí je důležitá břitová geometrie nástroje (obr. 2.8), která má vliv na životnost nástroje, produktivitu a stabilitu řezání, dále ovlivňuje tepelné a

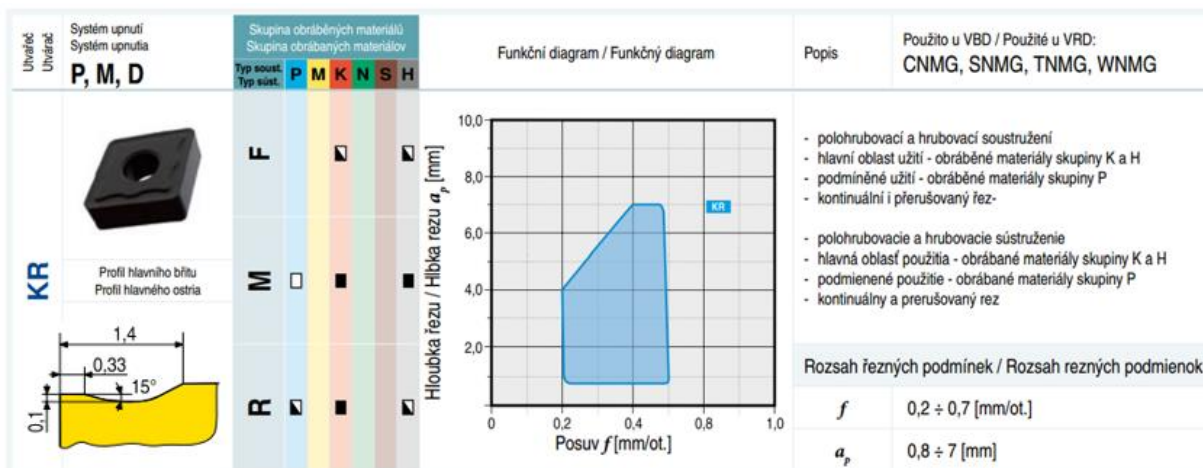
silové zatížení nástroje a spotřebu energie. Geometrie nástroje musí splnit požadavky na přesnost rozměrů a kvalitu obroběného povrchu³⁶.



Obr. 2.8 Úhly soustružnického nástroje⁶⁴.

Utvařec třísky

Utvařec třísky (obr. 2.9) spolu s geometrií nástroje a řeznými parametry by měl zajistit správný tvar třísek a co nejmenší objemový součinitel třísek (poměr objemu nestlačených třísek vzhledem k odebranému materiálu z povrchu polotovaru)³⁶. U vysoce pevných materiálů a tedy i u kalených ocelí je důležité, aby břit umožňoval volný odchod třísek a nenarůstalo tak nebezpečí poškození břitu²⁷.



Obr. 2.9 Utvařec KR soustružnické VBD (Dormer Pramet)⁶⁴.

Poloměr zaoblění špičky

Důležitým parametrem z hlediska funkce a výkonnosti je poloměr zaoblění špičky břitové destičky. Volba poloměru břitové destičky ovlivňuje kvalitu povrchu, dělení třísky, velikost řezných sil působících při vstupu a výstupu ze záběru a pevnost břitové destičky. Velký poloměr zaoblění špičky umožňuje dosažení lepší kvality povrchu, vyšší pevnosti břitu a tím i delší životnosti nástroje³⁵.

Legující prvky

Uhlík je rozhodujícím prvkem, který ovlivňuje obrobitelnost a mechanické vlastnosti oceli. Jeho množství má vliv na kalitelnost oceli (transformace austenitu na martenit)² a na stabilizaci austenitu (snižuje M_s a M_f)³⁸.

Mangan patří mezi austenitotvorné prvky. Jako legující prvek zvyšuje tvrdost, pevnost a prokalitelnost. Posouvá ARA diagram doprava. Zvyšuje množství zbytkového austenitu po kalení^{37,38}.

Nikl se řadí mezi austenitotvorné prvky, které zvyšují prokalitelnost. Zvýšení prokalitelnosti je podstatně menší než u manganu a chromu. Nikl má malý vliv na odolnost proti popouštění^{38,39}.

Chrom patří mezi feritotvorné a karbidotvorné prvky. Karbidy chromu rozpuštěné v austenitu pozitivně ovlivňují prokalitelnost. Nerozpuštěné karbidy naopak prokalitelnost snižují. Karbidy chromu se rozpouštějí až při vyšších teplotách, proto je nutné správně stanovit kalicí teplotu, aby se karbidy chromu při austenitizaci rozpustili. Chromové oceli jsou odolné proti popouštění, protože chrom zvyšuje teplotu A_{c1} ^{37,38}.

Molybden je feritotvorný prvek, patří mezi středně silné karbidotvorné prvky a má velký vliv na tvrdost a pevnost. Molybden zvyšuje stabilitu martenzitu po zakalení, tj. posouvá jeho rozpad k vyšším popouštěcím teplotám. Snižuje hodnoty teplot M_s a M_f ^{37,38,39}.

Vanad je feritotvorný prvek a tvoří s uhlíkem velmi stabilní karbid vanadu VC³⁷. Pro rozpuštění karbidu vanadu se musí ocel ohřát na velmi vysokou teplotu, potom má vanad silný vytvrzovací efekt. Vanad silně ovlivňuje odolnost proti popouštění u kalených ocelí^{38,39}.

Wolfram patří mezi feritotvorné a karbidotvorné prvky. Wolfram rozpuštěný v austenitu zvyšuje austenitizační teplotu³⁷, dále zvyšuje prokalitelnost a žáruvzdornost³⁸.

Křemík se řadí mezi feritotvorné prvky³⁷. Zvyšuje prokalitelnost oceli a odolnost proti popouštění³⁸. Rozpad zbytkového austenitu probíhá při vyšších teplotách než u nelegovaných ocelí a začátek rozpadu martenzitu u popouštění se posouvá k vyšším teplotám³⁷.

Bor patří mezi feritotvorné prvky. Prodlužuje začátek austenitické transformace³⁷, potlačuje vznik feritu a tím zvyšuje prokalitelnost³⁸.

Zbytkový austenit

Mezi teplotami M_s a M_f se austenit transformuje na martenzit, nikdy však podíl martenzitu ve výsledné struktuře nedosáhne 100 %, protože je zachováno určité množství zbytkového austenitu¹¹. Austenit je měkká, plastická fáze, způsobuje snížení tvrdosti dílců po kalení, má vysokou tvárnost a značnou houževnatost, což jsou nevýhodné vlastnosti z hlediska obrobitelnosti. Množství zbytkového austenitu závisí na řadě faktorů, např.: na obsahu uhlíku a legujících prvků, podmínkách ochlazování,... a jeho podíl lze v kaleném materiálu snížit např.: popouštěním, zmrazováním (kap. 2.5), použitím kapalného dusíku³⁰. Velikost austenitického zrna má vliv na řadu mechanických i technologických vlastností po kalení a popouštění (např. prokalitelnost, vrubová houževnatost, tvoření trhlin po zakalení)^{11,24,23}.

3 OBRÁBĚCÍ TECHNOLOGIE VYUŽÍVANÉ VE FIRMĚ

Pro obrábění dílců jsou ve firmě využívány zejména CNC stroje¹:

- CNC soustruhy,
- CNC obráběcí centra,
- CNC brusky.

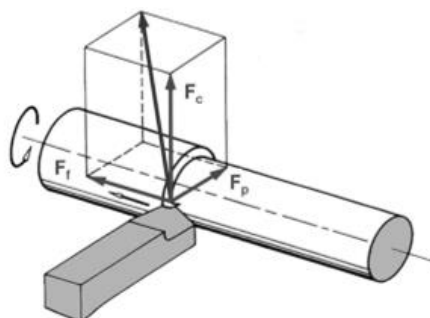
Dále jsou pro pomocné a speciální operace k dispozici klasické soustruhy, frézky, vrtačky, pily pro řezání tyčí a tabulí, stroje pro výrobu ozubení, bezhrotá bruska, atd¹.

V dalších kapitolách budou podrobněji rozebrány hlavní obráběcí technologie využívané ve firmě - soustružení, frézování, vrtání a broušení¹.

3.1 Soustružení

Soustružení patří mezi jednu z nejpoužívanějších a nejstarších obráběcích operací. Používá se k vytvoření rotačních součástí pomocí jednobřitého nástroje. Soustružení je kombinace dvou pohybů - rotace obrobku a přímočarého posuvného pohybu nástroje (obr. 3.1). Nástroj se pohybuje buď rovnoběžně s osou otáčení obrobku, tj. podélný posuv (podélné soustružení), nebo vykonává pohyb kolmý k ose obrobku, což je příčný posuv (čelní soustružení). Kombinace obou pohybů umožňuje vytvoření kuželové nebo zakřivené plochy. CNC řídicí jednotky soustruhů nabízejí mnoho programovatelných možností všech druhů soustružení^{41,45}.

Řezné podmínky soustružení v příloze 6.



Obr. 3.1 Soustružení, složky řezné síly⁴⁴.

3.2 Frézování

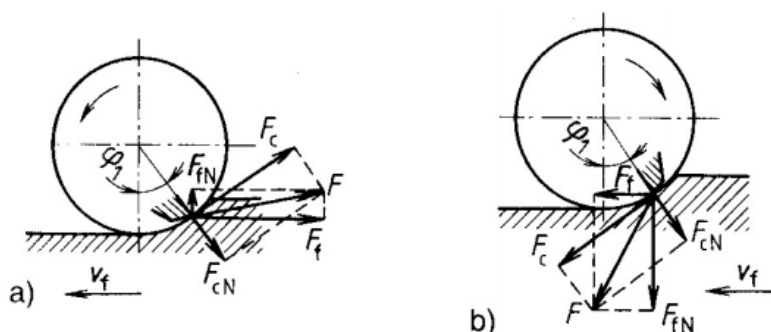
Frézování je obráběcí metoda rovinných nebo tvarových ploch, vnitřních nebo vnějších. Nástroje jsou obvykle vícebřité. Posuvný pohyb obvykle přímočarý, někdy otáčivý nebo obecný koná nejčastěji obrobek a hlavní řezný pohyb koná nástroj. Řezný proces je přerušovaný. Jednotlivé zuby frézy postupně vcházejí a vycházejí z materiálu a odřezávají třísky proměnné tloušťky. Moderní frézovací stroje zajišťují plynule měnitelné posuvné pohyby ve všech směrech^{41,45}.

Rozlišují se dva základní způsoby frézování: frézování obvodem frézy (válcové frézování) a čelem frézy (čelní frézování). Další způsoby odvozené od základních způsobů je např. frézování okružní a planetové^{41,45}.

Frézování se dělí podle otáčení frézy vůči směru posuvu na frézování nesousledné (protisměrné) a sousledné (obr. 3.2). Při nesousledném frézování nástroj rotuje v opačném smyslu, než je posuv obrobku. Tloušťka třísky se mění z nulové hodnoty

na maximální hodnotu. Při sousledném frézování rotuje nástroj ve směru posuvu obrobku. Zub frézovacího nástroje vniká do materiálu v místě vzniku maximální tloušťky třísky^{41,45}.

Řezné podmínky frézování v příloze 7.



Obr. 3.2 Řezné síly na zubu frézy při válcovém frézování⁴¹
a) nesousledném frézování b) sousledném frézování.

3.3 Vrtání

Vrtání je obráběcí metoda vnitřních rotačních ploch. Nástroj je nejčastěji dvoubřítý. Díry se zhotovují buď z plného materiálu, nebo se zvětšují již předpracované díry (předkované, předvrtané, předlité,...)^{41,45}.

Nástroj obvykle koná hlavní řezný pohyb a ve směru jeho osy i posuvový pohyb. Řezná rychlost je největší na obvodě nástroje a směrem ke středu se zmenšuje. U vrtání proto platí, že se řezná rychlost rovná obvodové rychlosti na jmenovitém průměru nástroje^{45,48}. Řezná rychlost patří mezi nevýznamnější faktory ovlivňující životnost nástroje, požadovaný příkon a krouticí moment. Mezi faktory ovlivňující utváření třísek, drsnost povrchu, kvalitu díry i požadovaný příkon patří posuvová rychlost⁴⁹.

Řezné podmínky vrtání v příloze 8.

3.4 Broušení

Broušení patří mezi jednu z nejstarších dokončovacích metod obrábění používanou pro obrábění (vnějších nebo vnitřních) rovinných, rotačních nebo tvarových ploch. Zrna brousícího nástroje jsou náhodně rozmístěna na povrchu nástroje, jsou spojená pojivem a každé zrno má jiný geometrický tvar. Volná místa mezi zrny se nazývají póry⁴¹. Během broušení vznikají třísky malého průřezu a po broušení na povrchu obrobku zůstávají nepravidelné stopy⁴⁶.

Broušení se jako dokončovací operace používá pro dosažení vysoké přesnosti rozměrů a kvality povrchu. Umožňuje obrábění materiálů, které lze obrábět špatně nebo vůbec (kalené oceli, keramické materiály, sklo,...). Broušení lze použít i pro úběr velkého množství materiálu při jednom pracovním zdvihu. Tato progresivní metoda hloubkového broušení vyžaduje speciální tuhé stroje s vysokým příkonem elektromotoru (30 kW a více). Vzniklá kvalita plochy je srovnatelná s běžným broušením^{41,46}.

Řezné podmínky broušení v příloze 9.

4 PROGRAMOVÁNÍ CNC STROJŮ

4.1 Základní definice a principy

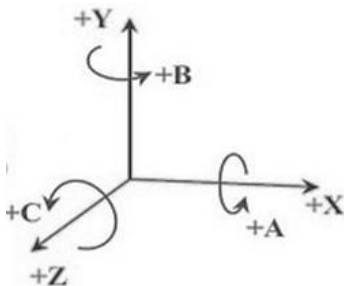
CNC je zkratkou anglických slov Computer Numerical Control a značí: počítačem (číslicově) řízený stroj. Pracovní funkce stroje jsou ovládány programem pomocí řídicího systému. Program je tvořen skupinami znaků, které jsou navzájem oddělené a tvoří věty (bloky) programu⁵⁴.

Výhody CNC stroje⁵⁴:

- „pružnost“ stroje - lze jej rychle přizpůsobit jiné výrobě,
- práce v automatizovaném cyklu,
- vysoká přesnost výroby,
- nízké náklady na výrobu – jeden CNC stroj nahradí několik konvenčních strojů,
- nízké strojní a vedlejší časy.

Norma ČSN ISO 841 popisuje souřadnicový systém číslicově řízeného stroje. Používá se kartézský systém souřadnic (obr. 4.1), což je pravotočivý a pravouhlý systém s osami X, Y, Z. Osy pro rotaci se označují A, B, C a jsou rovnoběžné s osami X, Y, Z⁵⁴.

V tabulce 4.1 jsou popsány nulové a vztažné body, které jsou pro lepší orientaci v této problematice přiblíženy na obrázcích 4.2 a 4.3.



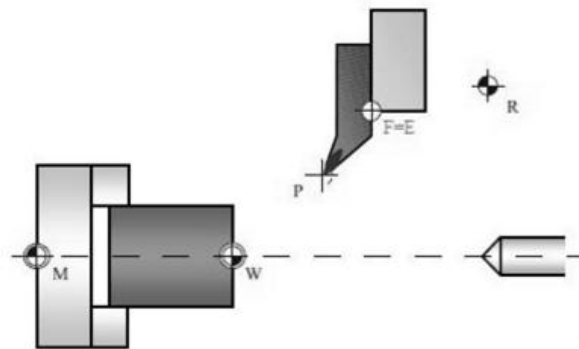
Obr. 4.1 Kartézský souřadnicový systém⁵⁵.

Tab. 4.1 Nulové a další vztažné body^{54,56,57}.

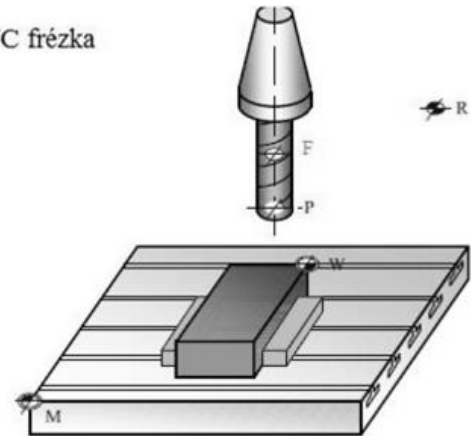
Znak	Název bodu	Popis
W	Nulový bod obrobku	Nastavuje ho programátor, který jej vloží do nejvýhodnějšího místa obrobku pomocí funkce G (obr. 4.2, obr. 4.3).
M	Nulový bod stroje	Je pevně stanoven výrobcem. Je to výchozí bod pro všechny další souřadnicové systémy a vztažné body na stroji. Soustruh – bod M je umístěn v ose rotace obrobku na čele vřetene. Frézka – bod M je umístěn v krajní poloze stolu frézky v obou osách.
R	Referenční bod stroje	Tento bod je také stanoven výrobcem. Vzdálenost nulového bodu M a referenčního bodu R je vložena do paměti řídicího systému. Referenční bod je realizován koncovými spínači.

P	Bod špičky nástroje	Bod nutný pro nastavení délkové korekce a rádiusové korekce nástroje. Soustružení – P leží na teoretické špičce nástroje. Frézování – P leží v ose nástroje na jeho čelní ploše.
F	Vztažný bod suportu nebo vřetene	Bod výměny nástroje. U soustruhu je na revolverové hlavě, u frézky je na čele vřetene v ose rotace. Dráha bodu F je korigována pomocí délkových korekcí.
E	Bod nastavení stroje	Bod na držáku nástroje. Při upnutí se ztotožní s bodem F.

CNC soustrh

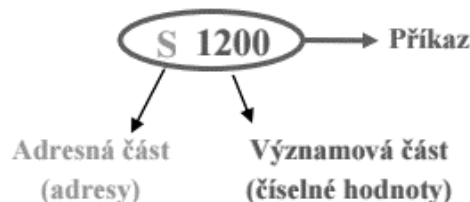
Obr. 4.2 Nulové a další vztažné body na CNC soustruhu⁵⁶.

CNC frézka

Obr. 4.3 Nulové body a další vztažné body na CNC frézce⁵⁶.

4.2 Úvod do programování CNC strojů

Každý NC program se skládá z bloků (vět). Bloky se skládají z jednotlivých příkazů (slov). Příkaz se skládá ze dvou částí (obr. 4.4): 1. adresná část a 2. rozměrová nebo významová část⁵⁸.

Obr. 4.4 Popis slova v bloku programu⁵⁸.

Blok (věta) v programu může mít pořadí adres: **N G X Y Z F S T M**. Toto pořadí není povinné, ale doporučuje se jej dodržovat pro větší přehlednost a lepší kontrolu programu⁵⁴.

Norma ČSN ISO 6983-1 uvádí značení a význam adres. Pro výrobce řídicích systémů jsou některá písmena závazná, některá doporučená. Neobsazená písmena abecedy jsou volná a výrobci je mohou použít pro své programovací funkce⁵⁴. Významy nejpoužívanějších adres jsou v tabulce 4.2.

Norma ČSN ISO 6983-1 také rozlišuje přípravné funkce (G-funkce) v řadě G00 – G99 a pomocné funkce (M-funkce) v řadě M00 – M99. Neobsazená místa v řadách mohou výrobci využít dle svých potřeb. Tabulky 4.3 a 4.4 uvádí některé závazné funkce, které jsou totožné u všech výrobců^{54,58}.

Tab. 4.2 Význam nejpoužívanějších adres^{54,58}.

Písmeno	Význam
N	Číslo bloku (věty).
X, Y, Z	Základní osy souřadného systému.
A, B, C	Rotace kolem základních os.
U, V, W	Paralelní pohyb se základními osami.
G	Přípravná (geometrická) funkce.
M	Pomocná (přípravná) funkce.
F	Posuv.
S	Otáčky vřetena nebo konstantní řezná rychlost.
T	Nástroj.
R	Hodnota rádiusu nebo polární souřadnice.
L	Volání programu.

Tab. 4.3 G-funkce a jejich význam^{54,58}.

Označení funkce	Význam
G00	Rychloposuv - lineární interpolace.
G01	Pracovní posuv - lineární interpolace.
G02	Kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček.
G03	Kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček.
G17	Pracovní rovina X-Y.
G18	Pracovní rovina Z-X.
G19	Pracovní rovina Y-Z.
G33	Řezání závitu.
G40	Zrušení korekcí.
G41	Zapnutí korekce rádiusů. Nástroj vlevo od kontury obrábění.
G42	Zapnutí korekce rádiusů. Nástroj vpravo od kontury obrábění.
G54 – G59	Posuvy nulového bodu (absolutně i přírůstkově).
G90	Absolutní programování.
G91	Přírůstkové programování.
G92	Omezení otáček nástroje
G94	Posuv v milimetrech za minutu [min^{-1}].
G95	Posuv v milimetrech za jednu otáčku [mm].
G96	Konstantní řezná rychlost.

Tab. 4.4 M-funkce a jejich význam^{54,58}.

Označení funkce	Význam
M00	Programové zastavení.
M03	Spuštění otáček vřetena ve směru hodinových ručiček.
M04	Spuštění otáček vřetena proti směru hodinových ručiček.
M05	Zastavení vřetene.
M06	Výměna nástroje.
M08	Zapnutí čerpadla (chlazení, mazání).
M17	Vypnutí čerpadla (chlazení, mazání).
M30	Konec programu.

Základní struktura NC programu:

ZAČÁTEK PROGRAMU – základní informace o obrobku⁵⁸:

- % - začátek programu (firma uvádí % i na konci programu),
- O – číslo programu,
- mohou následovat poznámky uvedené v závorce.

TĚLO PROGRAMU – informace o pohybu nástroje dle konkrétní výkresové dokumentace⁵⁸:

- hlavní program,
- vedlejší program.

KONEC PROGRAMU – poslední věta, která značí konec celého programu⁵⁸:

- **M30** - nejpoužívanější funkce, **M02**.

Sestavení programu:

1. **Ruční programování** – programátor sestaví NC program zapisováním ISO kódu podle přiloženého výkresu⁵⁴.
2. **Díleenské programování** – kvalifikovaná obsluha sestaví NC program pro další součást přímo na CNC strojích v překrytém čase⁵⁴.
3. **CAD/CAM systémy** – automatické vygenerování programu pomocí post-processoru pro řídicí systém daného stroje⁵⁴. Edgecam je CAM systém využívaný ve firmě.

5 SORTIMENT NÁSTROJŮ PRO OSAZOVÁNÍ CNC STROJŮ

5.1 Sortiment nástrojů pro soustružení

SANDVIK COROMANT

CB7015 (BN) – H10 (H05 – H15)

Třída tvořená 50% jemnozrnného kubického nitridu bóru a keramických pojivem. Je určena pro spojitě až lehké přerušované řezy při vysokých řezných rychlostech³⁵.

CB7025 (BN) – H15 (H10 – H20)

Třída s 60% kubického nitridu bóru v keramickém pojivu. Pro soustružení tvrzených součástí je CB7025 univerzální třídou. Je to první volba pro lehké až středně těžké přerušované řezy při středních řezných rychlostech^{35,60}.

CB7525 (BN) – H25 (H20 – H30)

Houževnatá třída tvořená 90% jemnozrnného kubického nitridu bóru a keramickým pojivem. Je vhodná pro soustružení tvrzených součástí s těžkými přerušovanými řezy³⁵.

CC6050 (CC) – H05 (H01 – H10)

Směsná keramika na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3). Tato třída má dobré tepelné vlastnosti a odolnost proti opotřebení. Přednostně je doporučena pro lehké spojitě řezy při dokončování⁶⁰.

CC670 (CA) – H10 (H05 – H15)

Keramika vyztužená whiskery s velmi vysokou houževnatostí. Je možné jí použít při soustružení tvrzených součástí za nepříznivých podmínek^{53,60}.

DORMER PRAMET

Hlavní oblast použití:

TB310 (H05 – H10)

Polykrystalický kubický nitrid bóru, který má vysokou odolnost proti otěru. Je vhodný pro dokončovací operace, mírně přerušovaný řez a stabilní záběrové podmínky⁶⁴.

TC100 (H05 – H20)

Směsná keramika na bázi korundu (Al_2O_3) a karbidu titanu (TiC). Má velmi vysokou tepelnou odolnost při obrábění bez řezné kapaliny. Řezný materiál vhodný pro vysoké řezné rychlosti a stabilní záběrové podmínky⁶⁴.

T8315 (H05 – H15)

Vysoce otěruvzdorný materiál, tvořený submikronovým substrátem s relativně nízkým obsahem kobaltu. PVD povlak je nano-vrstevnatý s gradientními přechody a se sníženým vnitřním pnutím při zvýšení tvrdosti. Je vhodný pro soustružení při vyšších řezných rychlostech a středním průřezu třísky⁶⁴.

Další použití:**T8330 (H15 – H25)**

Tento materiál je nejuniverzálnější člen řady T8300. Je tvořený submikronovým substrátem, pojivem s relativně vysokým obsahem kobaltu a nano-vrstevnatým PVD povlakem s gradientními přechody. Má dobrou provozní spolehlivost. Je vhodný pro soustružení při středně velké řezné rychlosti i za ztížených záběrových podmínek⁶⁴.

T5305 (H15 – H20)

Materiálem pro řezné nástroje je jemnozrný substrát s nízkým obsahem kobaltu, se silnou vrstvou MT-CVD povlaku a vrstvou Al₂O₃ na povrchu. T5305 je nejotěruvzdornější materiál řady 5300. Je vhodný pro spojitě až lehké přerušované řezy při vysokých řezných rychlostech⁶⁴.

T9315 (H10 – H20)

Základem materiálu je funkčně gradientní substrát s jemnou strukturou a kobaltové pojivo. Základní vrstva povlaku je z TiCN nanosená technologií MT-CVD. Na ní je vrstva povlaku α-Al₂O₃⁶⁵.

T8315, T8330, T5305, T9315 patří mezi novou generaci řezných materiálů UP!GRADE, která má nové substráty a nově vyvinuté MT-CVD a PVD povlaky⁷⁰.

WNT

V tabulce 5.1 je sortiment materiálů, který společnost WNT doporučuje pro obrábění kalených materiálů.

Tab. 5.1 Sortiment WNT pro kalené materiály⁶⁶.

Kalený materiál	Sortiment
48 HRC – 54 HRC	PBC 25, PBC 25-S
54 HRC – 60 HRC	PBC 25, PBC 40, PBC 25-S a PBC 40-S
58 HRC – 65 HRC	PBC 25, PBC 40, PBC 25-S a PBC 40-S

PBC 25-S

Povlakovaný CBN (obsah CBN 65 %) v provedení sendvič. Vhodný pro tvrdé obrábění nepřerušovaným řezem^{66,67}.

PBC 40-S

Povlakovaný CBN (obsah CBN 55 %) v provedení sendvič. Vhodný pro tvrdé obrábění přerušovaným řezem^{66,67}.

PBC 25

Nepovlakovaný standartní druh CBN (obsah CBN 65 %) s podložkou ze slinutého karbidu. Vhodný pro nepřerušovaný a lehce přerušovaný řez⁶⁷.

PBC 40

Nepovlakovaný standartní druh CBN (obsah CBN 55 %) s podložkou ze slinutého karbidu. Vhodný pro nepřerušovaný až silně přerušovaný řez⁶⁷.

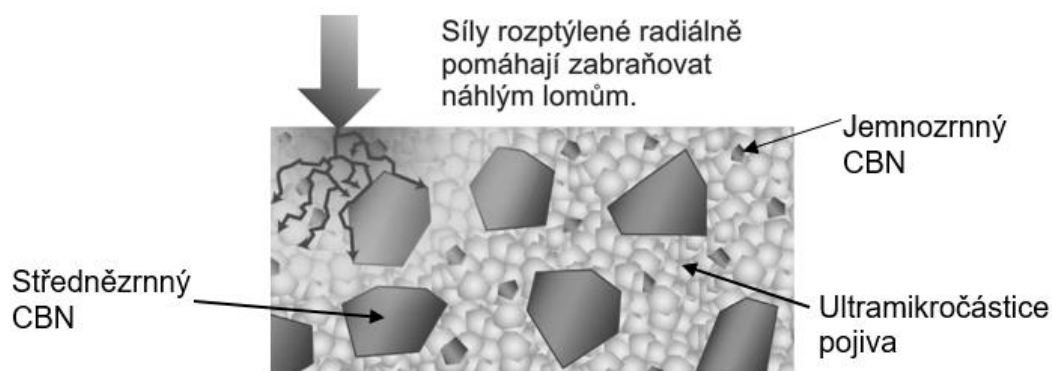
MITSUBISHI

BC8110 a BC8120

Třídy BC8110 i BC8120 jsou tvořené jemnozrnným a střednězrnným CBN s ultramikročásticemi pojiva tak, aby zabráňovaly tvorbě a šíření trhlin, které mohou způsobovat náhlé lomy (obr. 5.1). Obě třídy mají dlouhou životnost, vysokou pevnost břítu a dobrou stabilitu povlaku⁶¹.

Třída BC8110 je povlakovaná vrstvou TiAlSiN pro vysokou odolnost proti opotřebení a vydrolování způsobeného nárůstkem. Následuje povlak TiAlN, který má vylepšenou přilnavost k povrchu a tím zvyšuje odolnost proti odlupování⁶¹.

Povlakování TiAlN u třídy BC8120 přináší zvýšenou odolnost proti tvorbě nárůstků a tím zabráňuje vydrolování. Odolnost proti opotřebení a odlupování je zvýšena díky vylepšení přilnavosti povlaku k CBN^{61,62}.



Obr. 5.1 Struktura BC8110/BC8120⁶¹.

BC8020

Střednězrnný CBN s povlakem TiAlN je vysoce odolný proti opotřebení. Destičky z BC8020 mají dlouhou trvanlivost a zlepšenou výkonnost obrábění při těžkém nebo přerušovaném řezu⁷⁸.

MBC010

Extrémně jemnozrnný CBN s povlakem TiN. Vysoká odolnost proti opotřebení umožňuje plynulé obrábění při vysokých řezných rychlostech (nad $300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)⁷⁸.

MBC020

Extrémně jemnozrnný CBN přináší vysokou houževnatost ostří. Povlak založený na TiAlN poskytuje vynikající odolnost vůči opotřebení. Vhodný pro širokou škálu aplikací od plynulého řezu po lehký přerušovaný řez⁶³.

MB8025

Nepovlakovaný jemnozrnný CBN, vhodný pro plynulý řez při středních až vysokých rychlostech⁷⁸.

MB835

Nepovlakovaný extrémně jemnozrnný CBN, který má vynikající odolnost proti lomu. Vhodný pro těžký přerušovaný řez⁷⁸.

5.2 Sortiment nástrojů pro frézování

SANDVIK COROMANT

CB50 – H05 (H01 – H10)

Třída s hroty osázenými kubickým nitridem bóru. Toto provedení nabízí vysokou houževnatost bříty a zároveň dobrou odolnost proti opotřebení. Třída CB50 je vhodná pro obrábění za příznivých podmínek⁶⁸.

GC1010 – H10 (H05 – H15)

Slinutý karbid s PVD povlakem. Tuto třídu je možné použít v širokém spektru obráběcích operací - od hrubování po dokončování. Má velmi vysokou odolnost proti plastické deformaci, dobrou odolnost proti otěru a vysokou tepelnou odolnost. Díky těmto vlastnostem je možné tuto třídu použít i pro dlouhé doby v řezu⁶⁸.

GC1030 – H10 (H10 – H20)

Slinutý karbid povlakovaný metodou PVD. Je vhodný pro frézování tvrzených součástí při nízkých rychlostech posuvu a středních řezných rychlostech⁶⁸.

GC4220 – H25 (H15 – H30)

Povlakovaná karbidová třída. Je určena pro hrubovací operace⁶⁸.

CT530 – H25 (H10 – H30)

Cermetová třída pro frézování s vysokým leskem obrobené plochy⁵³. Vhodná pro dokončování při nízkých až středních řezných rychlostech⁶⁸.

GC3040 – H25 (H10 – H20)

Slinutý karbid s povlakem určený pro hrubovací operace při nízkých až středních řezných rychlostech⁶⁸.

GC1025 – H10 (H10 – H20)

Slinutý karbid s PVD povlakem. Určený pro frézování při středních řezných rychlostech⁶⁸.

DORMER PRAMET

Hlavní oblast použití:

M5315 (H05 – H20)

Materiál je tvořený substrátem typu H s relativně nízkým obsahem kobaltu. Povlak aplikovaný technologií MT-CVD je kombinací tenké vrstvy TiCN a vrstvy α -Al₂O₃ na povrchu. Řezná hrana má velmi dobrou odolnost proti opotřebení. Řezný materiál je vhodný pro střední až vysoké řezné rychlosti a stabilní záběrové podmínky. Je schopný pracovat za sucha, použití chladicí kapaliny je možné při ideálních záběrových podmínkách^{70,71}.

M8310 (H05 – H15)

Vysoce otěruvzdorný materiál řady M8300, obsahuje ultra-submikronový substrát s relativně nízkým obsahem pojící fáze. PVD povlak je multivrstevnatý na bázi AlTiN a TiAlSiN, má speciální finální úpravu. Materiál M8310 je vhodný pro dokončovací a polodokončovací operace a je použitelný při stabilních záběrových podmínkách⁷¹.

8215 (H05 – H15)

Velmi univerzální materiál, který je tvořený submikronovým substrátem typu H s relativně nízkým obsahem kobaltu. Multivrstevnatý PVD povlak je na bázi AlTiN a TiAlSiN. Materiál 8215 se vyznačuje vysokou otěruvzdorností, dobrou odolností vůči

šíření mikrotrhlin a je vhodný pro operace s vysokou tepelnou zátěží. Je použitelný při vysokých řezných rychlostech a stabilních záběrových podmínkách⁷¹.

7205 (H01 – H10)

Materiálem pro řezné nástroje je ultrasubmikronový substrát bez kubických karbidů s velmi nízkým obsahem kobaltu. PVD povlak má zvýšenou odolnost proti oxidaci. Tento materiál se vyznačuje vysokou tvrdostí při zachování ohybové pevnosti a velmi dobrou odolností proti mechanickému opotřebení. Univerzální materiál, nelze jej použít pouze u superslitin (skupina S). Snese vysoké rychlosti, nižší až střední průřezy třísek a stabilní záběrové podmínky⁷¹.

7215 (H05 – H15)

Materiál tvořený submikronovým substrátem typu H s nízkým obsahem kobaltu a gradientním PVD povlakem. Vyznačuje se unikátními kluznými vlastnostmi a zvýšenou odolností proti oxidaci. Je použitelný při středních až vysokých řezných rychlostech a stabilních záběrových podmínkách. Je využitelný pro všechny skupiny obráběných materiálů⁷¹.

7010 (H05 – H15)

Materiálem pro řezné nástroje je jemnozrný substrát bez kubických karbidů s velmi nízkým obsahem kobaltu. Multivrstevnatý nanostrukturní PVD povlak má vysoký obsah Al. Univerzální materiál, vhodný pro operace charakterizované vysokou tepelnou zátěží. Je vhodný pro malé až střední průřezy třísek, vysoké řezné rychlosti a stabilní záběrové podmínky⁷¹.

T8315 (H05 – H15)

Vysoce otěruvzdorný člen řady T8300 se submikronovým substrátem a s relativně nízkým obsahem kobaltu. Nano-vrstevnatý povlak s gradientními přechody je nanosený technologií PVD. Je vhodný pro obrábění při vyšší řezné rychlosti. Má širokou oblast použití (skupiny M, K, N, H, podmíněně P a S)⁷¹.

M5315, M8310, T8315 patří mezi novou generaci řezných materiálů UP!GRADE, která má nové substráty a nově vyvinuté MT-CVD a PVD povlaky⁷⁰.

WNT – monolitní frézy ze SK

H Typ frézy bez děleného ostří (obr. 5.2). Určený na obrábění materiálů s vyšší pevností a / nebo materiálů s krátkou třískou, maximálně do 70 HRC. Povlaky frézy pro kalené materiály jsou: Ti 1000, Ti 1010 nebo Ti 2000 (tab. 5.2). Na obrábění materiálů s tvrdostí nad 63 HRC doporučuje WNT používat nástroje opatřené povlakem Ti2000⁶⁶.





N Fréza bez děleného ostří (obr. 5.3). Je určena na obrábění materiálů s pevností cca do 1000 N·mm⁻². Povlak frézy pro kalené materiály je Ti 1000 (u konkrétního nástroje je doporučení do jaké tvrdosti lze frézu použít)⁶⁶.

SCR Typ frézy vhodný pro HPC (vysoké výkony) a pro HSC (vysoké rychlosti). Díky povlaku Ti 1200 dosahuje fréza SCR při obrábění oceli, litiny a kalených materiálů optimální životnosti. Povlak lze používat až do teploty 1200 °C. Díky speciální geometrii břitů (obr. 5.4) lze dosáhnout nejvyšších hodnot f_z a maximální životnosti nástroje⁶⁶.

Vlastnosti povlaků fréz typu H, N a SCR jsou v tabulce 5.2.


 Obr. 5.2 Typ SK frézy H⁶⁶. Obr. 5.3 Typ SK frézy N⁶⁶. Obr. 5.4 Typ SK frézy SCR⁶⁶.

 Tab. 5.2 Povlaky SK fréz vhodné pro obrábění kalených materiálů⁶⁶.

Barva	Označení	Povlak	HV _{0,05} ⁽²⁾	Koeficient tření ⁽¹⁾	Maximální aplikační oblast
	Ti 1000	Monovrstvý povlak	3500	0,4	800 °C
	Ti 1010	Multivrstvý povlak	3600	0,2	800 °C
	Ti 2000	Multivrstvý povlak	3500	0,5	900 °C
	Ti 1200	Nanopovlak	-	-	1100 °C – 1200 °C

⁽¹⁾ proti oceli

⁽²⁾ zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse⁶⁹

K-TOOLS

TripleCoating Si

Adhezní vrstva TiN + středová vrstva AlTiN + vrchní nanokompozitní vrstva s vysokým obsahem křemíku (obr. 5.5). Možnost použití povlaku za vyšších teplot. Obrábění za intenzivních řezných podmínek. Oblast aplikace: zušlechťené oceli s tvrdostí nad 60 HRC^{72,73}.

TripleCoating Cr

Adhezní vrstva TiN + středová vrstva AlTiN + vrchní nanokompozitní vrstva CrAlSiN (obr. 5.6). Kombinuje vynikající houževnatost a tvrdost vrstvy AlTiN a extrémně vysokou tvrdost nanokompozitní vrstvy CrAlSiN. Použití: kalené materiály, nerezy, velmi náročné aplikace⁷².

Marwin Si

Nanokompozitní povlak TiAlSiN (obr. 5.7), který je tvořený základní vrstvou s vysokou tvrdostí a povrchovou vrstvou s vysokou chemickou i tepelnou stabilitou. Univerzální povlak pro širokou škálu aplikací: frézování, vrtání, vystružování⁷².


 Obr. 5.5 TripleCoating Si⁷³.

 Obr. 5.6 TripleCoating Cr⁷⁴.

 Obr. 5.7 Marwin Si⁷⁵.

5.3 Sortiment nástrojů pro vrtání

SANDVIK COROMANT

Karbidové třídy pro monolitní vrtáky:

GC1220 – H20 (H05 – H30)

Slinutý karbid s PVD povlakem o tloušťce 3 mikrometry, který je tvořený nanovrstvami TiAlN. Povlak zaručuje velmi dobrou spolehlivost břitu. Tato třída má skvělou kombinaci tvrdosti a houževnatosti⁶⁸.

K20 – H15 (H05 – H25)

Materiálem pro řezné nástroje je slinutý karbid s PVD povlakem z TiN. Substrátem je WC-Co⁶⁸.

GC1020 – H15 (H05 – H25)

Karbidová třída s PVD povlakem, která je vhodná pro vrtání většiny materiálů a má širokou oblast použití. Třidu tvoří jemnozrnny karbidový substrát s TiCN+TiN povlakem⁶⁸.

Třídy pro vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami:

GC4324 – H15 (H05 – H25)

Slinutý karbid s MT-CVD povlakem. Třída určená pro obvodové VBD, která má dobrou houževnatost a vysokou odolnost vůči opotřebení. Pro střední až vysoké řezné rychlosti. Technologie Inveio poskytuje nástroji vysokou odolnost proto otěru a dlouhou životnost⁶⁸.

GC4334 – (H10 – H25)

Slinutý karbid s povlakem. Třída určená pro obvodové VBD. Technologie Inveio poskytuje nástroji vysokou odolnost proto otěru a dlouhou životnost⁶⁸.

GC1044 – H20 (H10 – H30)

Karbidová třída s PVD povlakem, která je základní volbou pro středové VBD. Tato třída má velmi vysokou houževnatost a odolnost vůči opotřebení při malých až středních řezných rychlostech⁶⁸.

GC4044 – H20 (H10 – H30)

Slinutý karbid s PVD povlakem. Tato třída představuje první volbu pro obvodové VBD. Má vysokou houževnatost břitu a odolnost proti tvoření nárůstků⁶⁸.

DORMER PRAMET

Katalogy a brožury firmy PRAMET neuvádí materiály řezných nástrojů, které by měly hlavní oblast použití pro skupinu ISO H, kam patří kalené materiály. Pro skupinu ISO H jsou uvedeny pouze materiály, které lze použít podmíněně. Jsou to materiály řady D8300 a řady D9300, které jsou členy vrtacích materiálů nové generace UP!GRADE^{76,77}.

D8330 (H20 – H30), D8345 (H25 – H35)

D8330 je univerzální materiál pro obvodovou destičku a D8345 je univerzální materiál pro vnitřní destičku. Oba materiály jsou tvořené submikronovým substrátem s vysokým obsahem kobaltu a nanovrstevnatým PVD povlakem. Mají vyšší stabilitu řezné hrany v nestabilních záběrových podmínkách⁷⁶.

D9335 (H20 – H30)

Materiál určený pro obvodovou destičku. Funkčně gradientní substrát s relativně vysokým obsahem kobaltu a tenkým MT-CVD povlakem opatřeným vrstvou Al₂O₃. Materiál D9335 má vysokou provozní spolehlivost⁷⁶.

WNT

WTX – Vysoce výkonný SK vrták, krátký, pro obrábění tvrdých materiálů⁶⁵.

Tento vrták (obr. 4.9), vyrobený ze slinutého karbidu, je vhodný pro obrábění kalených ocelí o tvrdosti od 45 HRC do 65 HRC. Má vyladěnou geometrii břitů, speciální geometrii drážky pro odvádění třísky a speciální tloušťku jádra. Je určený pro hloubku vrtání do 3xD a je samostředící⁶⁵.

Nástroj je povlakován Ti 700 - multivrstevným povlakem TiAlN. Tento povlak je odolný vůči vysokým teplotám⁶⁵.



Obr. 5.8 WTX – Vysoce výkonný vrták pro obrábění tvrdých materiálů⁶⁵.

MITSUBISHI

MHS

Monolitní slinutý karbid s povlakem MIRACLE Coating (Al, Ti) N, který je vhodný i pro suché obrábění. Vrták (obr. 5.9) je určen pro nepřerušované vrtání ocelí s tvrdostí 35 HRC až 55 HRC⁷⁸.

VCHSM

Extrémně jemnozrný slinutý karbid s povlakem VIOLET, který má ve srovnání s povlakem TiN 2-3 krát vyšší životnost nástroje (obr. 5.10). Geometrie vrtáku je vhodná pro vrtání velmi tvrdých materiálů (60 HRC)⁷⁸.



Obr. 5.9 Vrták MHS⁷⁸.



Obr. 5.10 Vrták VCHSM⁷⁸.

5.4 Sortiment nástrojů pro broušení

NORTON

Tabulka 5.3 uvádí rozdělní brousících kotoučů katalogu NORTON podle aplikací.

Tab. 5.3 Keramické brousící kotouče (pojené brousící nástroje)⁸⁰.

	Broušení na kulato	Vnitřní broušení	Broušení na plocho	Řezné nástroje a frézy
Kalená ocel (> 56 HRC)	3SG 60 K VX	5NQ 80 KVQN	1TGP 60 HVX	5NQ 80 JQN
	SGB 60 K VX	5SG 60 K VX	IPA 60 EH20VTX	5SG 46 K VX
		3SG 60 K VX	3SG 60 IVXP	SGB 60 J VX

SGB, 3SG, 5SG

Směs konvenčních zrn a SG korundu. (SGB – střední koncentrace, 3SG – vysoká koncentrace, 5SG – velmi vysoká koncentrace). Patentované brusné zrna SG Norton je keramizované zrna na bázi oxidu hlinitého s jemnou mikrokrytalickou strukturou⁸⁰.

5NQ

Směs keramického zrna Norton Quantum a konvenčního zrna⁸⁰.

1TGP

Směs keramizovaných SG zrn s prodlouženým tvarem a konvenčního zrna⁸⁰.

IPA

Speciální korundové zrna používané v technologii VORTEX⁸⁰.

TYROLIT

Tabulka 5.4 obsahuje výběr brousících materiálů z katalogu TYROLIT vhodných pro ocel do tvrdosti 67 HRC.

Tab. 5.4 Výběr brousících materiálů a jejich rozdělení podle typu zrna⁸¹.

	Typ zrna	Označení	Pojivo	Nástroje
Ocel (< 67 HRC)	Karbid křemíku černý	48C	Pryžové	Brousící kotouče ploché elastické
			Keramické	Montované kotouče na stopkách Brousící a obtahovací kameny dvouzrnné
	Karbid křemíku zelený	49C	Pryžové	Brousící kotouče ploché elastické
			Keramické	Brousící a obtahovací kameny dvouzrnné Brousící a obtahovací pilníky
				Brousíky kruhové
	Umělý korund bílý	99A	Pryžové	Brousící kotouče ploché elastické
	Umělý korund tmavě růžový	99RA	Keramické	Brousící kotouče ploché

DIA-PRAHA

Brusivo z CBN je vhodné pro vysoce produktivní broušení kalené oceli (55 HRC – 65 HRC). Používá se nejčastěji při broušení kalených otvorů, dále při broušení na kulato a na plocho. Orovnávání se provádí minimálně a to rotační diamantovou kladkou nebo speciálním vícezrnným orovnávačem⁸².

CBN kotouče s keramickým pojivem pro broušení na plocho a na kulato se vyrábí na korundových, duralových nebo kovových tělesech. Korundové těleso dobře tlumí chvění a duralové těleso je pevné a lehké. Pro vysoké řezné rychlosti nad 100 m·s⁻¹ musí být těleso ocelové nebo z karbonu⁸².

Při broušení malých otvorů od \varnothing 1 mm do \varnothing 6 mm lze brousit CBN tělísky 1A1W v galvanické vazbě (obr. 5.11). Pro otvory od \varnothing 6 mm do \varnothing 25 mm se volí CBN tělíska A8 v keramické vazbě. Otvory nad \varnothing 22 mm lze brousit CBN kotoučky 1A1 v keramické vazbě, které mají pod CBN vrstvou keramické nosné těleso, za které se upínají na trn přes papírové podložky⁸².



Obr. 5.11 Broušení malých otvorů od \varnothing 1 do \varnothing 6 - 1A1W galvanická niklová vazba⁸².

6 OBRÁBĚNÍ KALENÉHO DÍLCE

Za účelem demonstrování obrábění kalené oceli byl ve firmě vybrán dílec s názvem KLOUB (obr. 6.1).



Obr. 6.1 Součást KLOUB.

6.1 Materiál

Pro dílec KLOUB byla zvolena ocel 90MnCrV8 (1.2842). Chemické složení, vlastnosti oceli a doporučené hodnoty pro tepelné zpracování jsou v tab. 6.1, tab. 6.2, tab. 6.3 a obr. 6.2.

Tab. 6.1 Chemické složení oceli 90MnCrV8⁸³.

Chemické složení [%]							
Prvek	C	Mn	P	S	Si	Cr	V
Min.	0,85	1,80			0,10	0,20	0,05
Max.	0,95	2,20	0,03	0,03	0,40	0,50	0,20

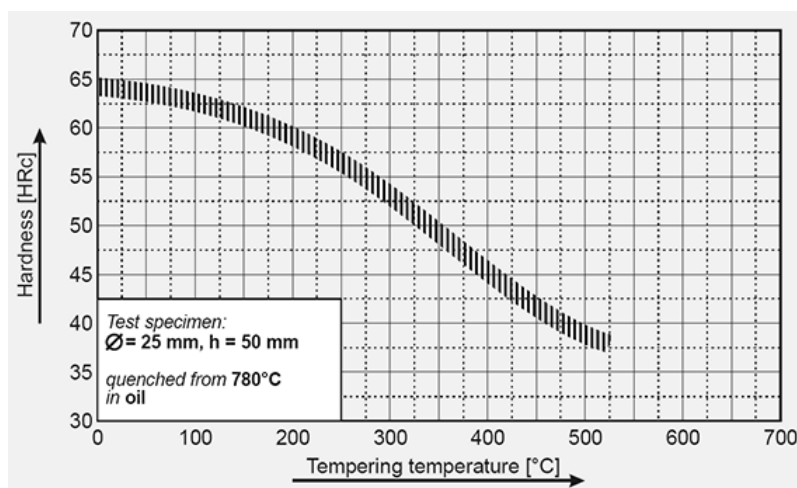
Tab. 6.2 Vlastnosti oceli 90MnCrV8^{83,84}.

Charakteristika	Nízko legovaná ocel ke kalení v oleji se střední prokalitelností a dobrou stálostí rozměrů po tepelném zpracování.
Použití	Tažné a řezné matrice, nástroje pro tváření, malé a střední formy pro tváření plastických hmot, měřidla, kalibry.
Modul pružnosti (při teplotě 20 °C)	210 GPa
Hustota	7,85 kg·dm ⁻³
Prokalitelnost při kalení do oleje	40 mm
Odolnost proti opotřebení ve stavu kaleném a popouštěném	Dobrá

Odolnost proti tlakovému namáhání ve stavu kaleném a popouštěném	Zvětšená
Houževnatost ve stavu kaleném a popouštěném	Zvětšená

Tab. 6.3 Doporučení pro tepelné zpracování^{83,84}.

Doporučené hodnoty pro tepelné zpracování						
Žihání na měkko	Teplota	700 ± 10 °C				
	Tvrдость	230 HB				
Kalení	Teplota	790 ± 10 °C				
	Vhodné ochlazovací prostředí	olej				
	Tvrдость	63 HRC				
Popouštění	Teplota	180 ± 10 °C				
	Závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
		62 HRC	60 HRC	55 HRC	50 HRC	44 HRC
Teploty fázových přeměn	$A_{c1} = 720 \text{ °C}$ $A_{c3} = 765 \text{ °C}$ $M_s = 180 \text{ °C}$					



Obr. 6.2 Tvrдость v závislosti na teplotě popouštění⁸³.

6.2 Stroj

Pro obrábění dílce KLOUB bylo zvoleno CNC obráběcí centrum VF0 od firmy Haas (obr. 6.3, obr. 6.4, tab. 6.4).



Obr. 6.3 Pohled do pracovního prostoru CNC obráběcího centra VF0 Haas.



Obr. 6.4 Celkový pohled na pracoviště s VF0 Haas.

Tab. 6.4 Základní informace o stroji VF0 Haas¹.

Výrobce	Haas
Typ	VF0
Rozměr stolu	660 x 356
Počet řízených os	3
Otáčky	max. 7 500 min ⁻¹
Max. výkon motoru vřetena	14,9 kW

6.3 Nástroje

V následující tabulce (tab. 6.5) jsou uvedeny nástroje použité pro operace vrtání a frézování vybraného kaleného dílce KLOUB (obr. 6.1). Tyto nástroje jsou uvedeny pod konkrétním označením v technologickém postupu (tab. 6.6). Na obrázku 6.5 jsou upínací čelisti pro upnutí dílce.

Tab. 6.5 Nástrojový list.

Označení	Nástroj	Název	Výrobce
T1	Čelní fréza pro frézování do rohu CoroMill® 390	R390-020A20-11M	Sandvik Coromant
	Břítová destička CoroMill® 390 pro frézování	R390-11 T3 08M-PL 1010	Sandvik Coromant
			
T2	Modulhard'andrea sestava Testarossa	KIT K01 $\varnothing 6 \sim \varnothing 108$ TRM 50	D'ANDREA
	VBD	WCGW 020102A PBC25	WNT
			

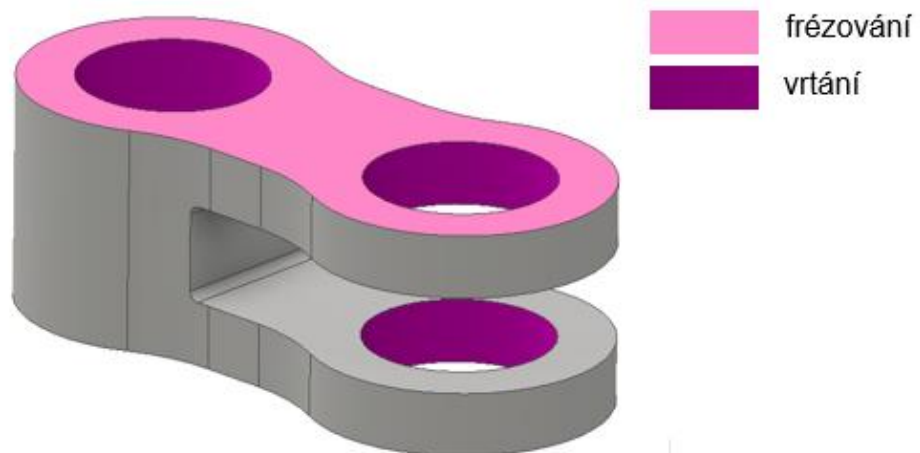


Obr. 6.5 Upínací čelisti.

6.4 Technologický postup

Technologický postup (tab. 6.6) je uveden od operace kalení. NC program je v příloze 11.

Na obrázku 6.6 je znázorněn prostorový model kaleného dílce KLOUB. Obráběné plochy jsou barevně rozlišeny podle metody obrábění: frézování – světle růžová, vrtání – fialová.



Obr. 6.6 Prostorový model dílce KLOUB.

Tab. 6.6 Technologický postup.

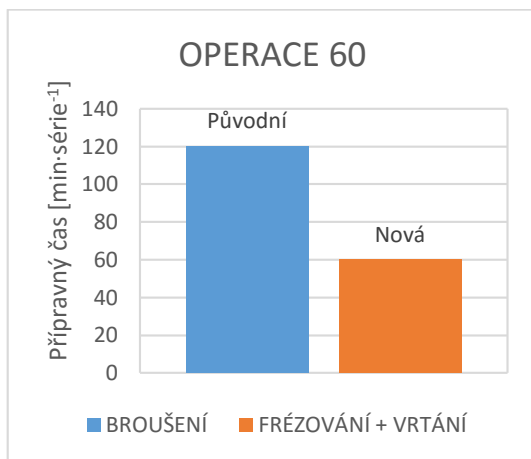
Číslo op.	Pracoviště	Popis	Nástroje, přípravky, pomůcky, měřidla	Materiál nástroje ⁽¹⁾
50	V kooperaci	KALIT na 56 ± 2 HRC.		
60	Haas VF0	FRÉZOVAT + VRTAT Upnout do čelistí. Frézovat plochu. Převrtat vrtací tyčí otvory na $\varnothing 10H7$, dodržet Ra 0,8 a kolmost 0,03.	T1 T2 Čelisti (obr. 6.5). Posuvné měřidlo digitální 0-150 mm. Kalibr válečkový oboustranný Mt 10 H7. Drsnoměr TR-130 Metrology. Páčkový úchylkoměr 800SG Mahr. Stojánek magnetický Mitutoyo 7010SN. Kontrolní trn.	HC BL
65	Ruční pracoviště	ODJEHLIT	Odhrotovací kotouč. Odjehlovací nůž.	
70	Kontrola	Kontrolovat $\varnothing 10H7$, Ra 0,8 a kolmost 0,03.	Drsnoměr TR – 130 Metrology. Kalibr válečkový oboustranný Mt 10 H7. Dutinoměr samostředící 3dotykový 08÷10 44A Mahr. Digit. dvousý výškoměr Tesa Micro-Hite PLUS M.	
80	Balírna	KONZERVOVAT + BALIT		

⁽¹⁾ značení dle ČSN ISO 513.

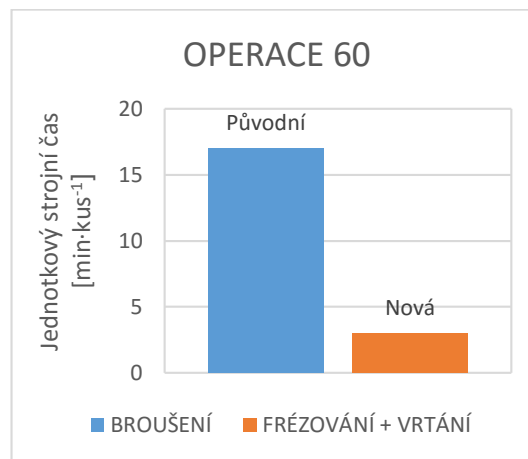
7 ZHODNOCENÍ NÁVRHU TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU V PODMÍNKÁCH FIRMY

Technologický postup (tab. 6.6) nahrazuje původní technologický postup, ve kterém byla operce 60 provedená metodou broušení. Grafy na obrázcích 7.1, 7.2 a 7.3 ukazují výhody nahrazení původní operace 60 (broušení) novou (frézování + vrtání).

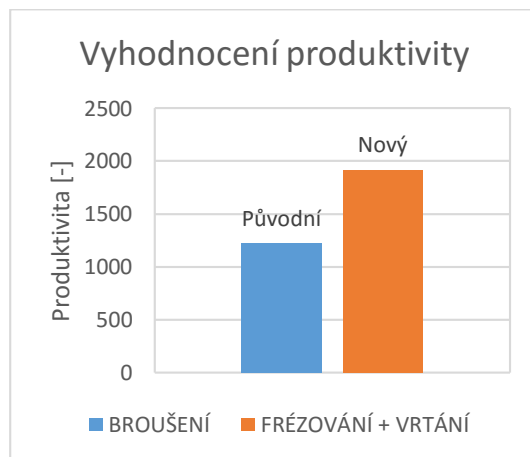
Následující vyhodnocení byla provedena na základě podkladů firmy (vyhodnocení produktivity, technologické postupy, průvodky na výrobní příkazy). Protože si firma nepřeje, aby byly zveřejněny konkrétní čísla a hodnoty, jsou výsledky porovnání zobrazeny pomocí grafů (obr. 7.1, 7.2 a 7.3) a procent.



Obr. 7.1 Porovnání přípravného času na sérii pro operaci 60.



Obr. 7.2 Porovnání jednotkového strojního času v operaci 60.



Obr. 7.3 Porovnání produktivity mezi původním návrhem výroby a novým návrhem výroby.

Celkově navržení nového výrobního postupu v operaci 60 vede ke snížení výrobních nákladů dílce KLOUB.

Graf na obrázku 7.1 ukazuje, že přípravný čas celé série v operaci 60 se zkrátil přibližně o polovinu.

Graf na obrázku 7.2 ukazuje, že jednotkový strojní čas na jeden kus v operaci 60 se zkrátil přibližně o 81 %.

Graf na obrázku 7.3 znázorňuje porovnání vyhodnocení produktivity mezi původním návrhem výroby a novým návrhem výroby.

7.1 Ekologie

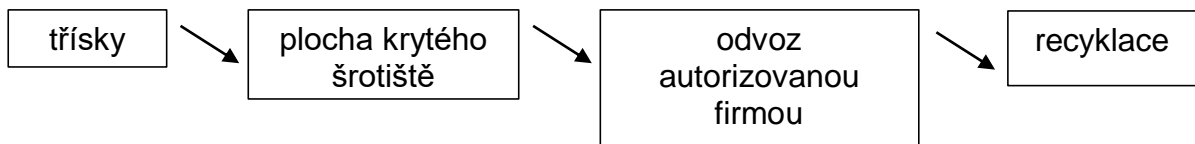
Firma je držitelem certifikátu normy ISO 14001, která podporuje ochranu životního prostředí a prevenci znečišťování. Tato norma klade důraz na dodržování legislativních požadavků týkajících se jednotlivých složek životního prostředí⁸⁶.

Systém environmentálního managementu je zavedený podle požadavků normy ISO 14001.

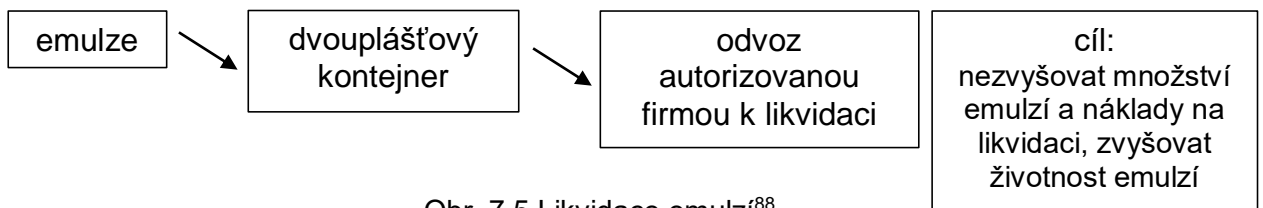
Identifikace a hodnocení environmentálních aspektů zahrnuje⁸⁷:

- emise do ovzduší,
- znečišťování vody,
- znečišťování a kontaminace půdy,
- odpadové hospodářství,
- využívání přírodních zdrojů (energie, suroviny, materiály, polotovary),
- zátěže životního a pracovního prostředí teplem, hlukem, zápachem apod.,
- ohrožení bezpečnosti práce.

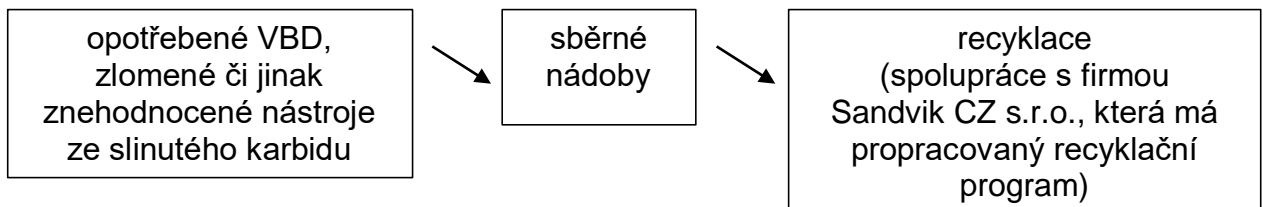
Příklady odpadového hospodářství



Obr. 7.4 Třískové hospodářství⁸⁸.



Obr. 7.5 Likvidace emulzí⁸⁸.



Obr. 7.6 Nakládání s opotřebenými nástroji ze SK⁸⁸.

Ve firmě se nakládá také s obaly. Firma má smlouvu o sdruženém plnění s EKO-KOMem, a.s., která zajišťuje plnění povinnosti zpětného odběru a využití odpadu z obalů⁸⁸.

8 DISKUSE

8.1 Materiály pro řezné nástroje

Katalogy, ze kterých byly v kapitole 5 vybírány materiály pro řezné nástroje, jsou součástí vybavení firmy. Z těchto katalogů (Sandvik Coromant, WNT, K-TOOLS,...) firma běžně objedná nástroje, upínače, příslušenství apod., a proto jsou z nich vybrané i materiály pro řezné nástroje vhodné pro obrábění kalených ocelí.

Ve většině katalogů se na konci každé části, věnované konkrétní metodě obrábění, nachází kapitola, ve které lze nalézt materiály pro řezné nástroje a jejich vhodnost pro obrábění jednotlivých skupin materiálů. Tyto skupiny materiálů jsou nejčastěji rozděleny podle ČSN ISO 513 (tab. 2.3). V příloze 10 1/2 jsou uvedeny příklady přiřazení materiálů pro řezné nástroje ke skupině H. V příloze 10 2/2 je příklad, kde je pod základním popisem a objednávacími čísly břitové destičky i uvedena použitelnost pro určité skupiny materiálů.

8.2 Obrábění kaleného dílce KLOUB

Materiálem dílce KLOUB je mangan-chrom-vanadová ocel 90MnCrV8, která je vhodná pro kalení oceli na požadovanou tvrdost 56 HRC. Je to univerzální nástrojová ocel.

Pro frézování čela (zarovnání) byla zvolena čelní fréza pro frézování do rohu CoroMill 390 se třemi břitovými destičkami ze slinutého karbidu s PVD povlakem. Tyto nástroje od společnosti Sandvik Coromant jsou součástí nástrojového vybavení firmy, proto byly voleny pro tuto operaci. Pro vyvrtávání byla zvolena sestava Kit Testarossa s TRM vyvrtávací hlavou. Tato sestava byla součástí nástrojového vybavení firmy a nemusela být pro tuto operaci speciálně objednávaná. Společnost D'ANDREA sice nabízí ve svém nejnovějším katalogu (2015) také břitové destičky vhodné pro kalené materiály, ale z důvodu dlouhodobé spolupráce se společností WNT, výhodnějších cen a rychlejší doby dodání, byly zvoleny břitové destičky z WNT katalogu.

Katalogem doporučené řezné podmínky pro břitovou destičku R390-11 T3 08M-PL 1010 a průměr nástroje 20 mm jsou přibližně:

$$n = 2\,070 - 1\,910 \text{ min}^{-1},$$
$$v_f = 497 - 458 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}.$$

Do NC programu byly zvoleny řezné podmínky vyhovující doporučeným (příloha 11):

$$n = 1\,900 \text{ min}^{-1},$$
$$v_f = 480 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}.$$

Katalogem doporučené řezné podmínky pro břitovou destičku WCGW 020102A PBC25 a průměr obráběné díry 10 mm jsou přibližně:

$$n = 9\,550 - 5\,095 \text{ min}^{-1}.$$

Do NC programu byly zvoleny otáčky nižší než doporučené, kvůli delšímu vyložení nástroje (příloha 11):

$$n = 3\,800 \text{ min}^{-1}.$$

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá tématem obrábění kalených ocelí na CNC strojích, jejich obrobitelností a způsoby kalení, materiály nástrojů vhodných k obrábění kalených ocelí a návrhem technologického postupu vytipovaného kaleného dílce.

Pro požadované výsledné vlastnosti oceli po kalení je důležité zvolit správný způsob kalení, kalicí teplotu, dobu výdrže a ochlazovací prostředí. Pro následné obrobení je nutné zohlednit obrobitelnost, volit správné stroje, nástroje a řezné podmínky.

Soustružení, frézování, vrtání a broušení jsou nejdůležitějšími obráběcími technologiemi používanými ve vybrané firmě. Pro tyto technologie jsou z katalogů výrobců vybrány materiály pro řezné nástroje a materiály vhodné pro broušení kalených ocelí. Těmito materiály jsou především slinuté karbidy, řezná keramika a kubický nitrid bóru, který je spolu s korundem a karbidem křemíku vhodný i pro broušení kalených ocelí.

Zvyšování životnosti a spolehlivosti, použití vyšších řezných rychlostí či vyšších hodnot posuvů dosahují výrobci buď vhodným povlakem, vhodnou geometrií nástroje, případně kombinací obojího.

Je zde navržen nový technologický postup vytipovaného dílce včetně volby stroje a nástrojů. Obrábění kaleného dílce KLOUB bylo provedeno ve vybrané firmě s ohledem na strojní park, kterým firma disponuje. Díky navržení nového technologického postupu pro operace následující po tepelném zpracování bylo dosaženo snížení strojích časů, snížení výrobní ceny a zvýšení produktivity vytipovaného dílce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Znojemské strojírny, s.r.o.* [online]. ©2012 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.strojirny.cz/index.php>
2. Kalitelnost – prokalitelnost. *Strojírenství: Vše co student potřebuje vědět* [online]. 2016 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/kalitelnost-prokalitelnost.html>
3. DRIML, Bohuslav. *KALENÍ A POPOUŠTĚNÍ* [online]. [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
4. Jominiho zkouška prokalitelnosti. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/download/Jominiho%20zkouska%20prokalitelnosti.pdf>
5. Kalení oceli: Teorie tepelného zpracování. *KMT Katedra materiálů* [online]. Liberec, 2007 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/TTZ/tz%20Dad/kaloceli.pdf
6. Prokalitelnost. *Bolzano* [online]. Kladno, ©2016 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: [http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_Prokalitelnost\(1\).pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_Prokalitelnost(1).pdf)
7. Měření prokalitelnosti. *ELUC* [online]. [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1574>
8. Kalení a popouštění. *Bodycote* [online]. ©2012-2014 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.bodycote.com/cs-CZ/services/heat-treatment/harden-and-temper.aspx>
9. Typy kalení: Tepelné zpracování. *Střední průmyslová škola strojnická Vsetín* [online]. 2013 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: http://www.spssvsetin.cz/index_htm_files/dumy/19/VY_32_INOVACE_19_13.pdf
10. DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu II. část. 2. vyd.* Brno: VUT Brno, 1976, 265 s. ISBN 80-214-1028-0
11. *Tepelné zpracování a slinování - přednášky* [online]. 2006 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf>
12. *Technologický postup při izotermickém tepelném zpracování oceli* [online]. Brno, 2005 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <https://mnet.mendelu.cz/mendelnet2005/articles/enviro/ucen.pdf>
13. VĚCHET, Stanislav. *Tepelné zpracování ocelí (druhy a způsoby): Prezentace* [online]. 2008, 39 s. [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2810347/>
14. BÍLKOVÁ, L. *Nízkoteplotní a kryogenní zpracování cementačních součástí.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miloslav Kouřil, CSc.
15. Bainitické kalení. *Strojírenství* [online]. ©2016 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/bainitick-kalen.html>

16. *Zakázková indukční kalírna INDURA s.r.o.* [online]. Martin Vystrčil, ©2016 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://indura.cz/>
17. Indukční kalení. *Rajmont* [online]. ©2005-2016 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-kaleni/>
18. Neutral hardening. *Metals India* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.metalsindia.com/content/neutral-hardening>
19. Chemicko-tepelné zpracování kovů. *Tumlikovo* [online]. TumliKOVO, ©2010 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/procesy/chemicko-tepelne-zpracovani-kovu/>
20. Kovové materiály a jejich zpracování. *Ústav materiálového inženýrství* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/4_2_kovove-materialy-a-jejich-zpracovani.pdf
21. VRÁBLÍK, Filip, Pavel STOLAŘ a Rainer BRAUN. *Užití polymerů v tepelném zpracování*. Čeřany, 2006.
22. Kalicí prostředky - teorie. *AZPROKAL* [online]. SUTU, ©2016 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.azprokal.cz/cz/prehled-sortimentu/chemicke-pripravky/kalici-oleje-a-polymery/teorie>
23. Rozpad austenitu. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Tepelne%20zpracovani%2009_10.pdf
24. STRNAD, Tomáš. *Obrobitelnost austenitické ocele: podklad k předmětu KTO/EMO*. Plzeň, 2011.
25. DE VOS, Patrik a SECO TOOLS. Příručka pro technology - Obrobitelnost. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-obrobitelnost.html>
26. BORO VAN, Petr. Efektivní obrábění těžkoobrobitelných materiálů. *Technický týdeník* [online]. 2014 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/efektivni-obrabeni-tezkoobrobitelnych-materialu_23868.html
27. BAUER, Rose a SK TECHNIK. Obrábění těžkoobrobitelných materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, (3) [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-tezkoobrobitelnych-materialu.html>
28. ISO H Tvrzená ocel. *Sandvik Coromant* [online]. ©2000-2012 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_h_hardened_steel/pages/default.aspx
29. Obrobitelnost – definice. *Sandvik Coromant* [online]. ©2000-2012 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition/pages/machinability-%E2%80%93-definition.aspx
30. Přeměna zbytkového austenitu. *T-support* [online]. ©2016 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/premena-zbytkoveho-austenitu-16>

-
31. HOLUBÁŘ, Pavel, Mojmír JÍLEK a Milan RŮŽIČKA. Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, (9) [cit. 2016-04-03]. DOI: Povlakovaný slinutý karbid. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-pvd-povlaky-pro-rezne-aplikace-a-tvareni.html>
 32. Povlakovaný slinutý karbid. *Sandvik Coromant* [online]. ©2000-2002 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx#7
 33. BITTNER, Jan. *Metody povlakování řezných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2010. 42s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
 34. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. 2008. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
 35. SANDVIK COROMANT. *Soustružení tvrzených součástí pomocí CBN* [online]. AB Sandvik Coromant, 2012 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global catalogues/cs-cz/c-2940-137.pdf>
 36. BRYCHTA, Josef. *Technologie II: díl 1*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1641-8.
 37. *Vliv legovacích prvků na vlastnosti ocelí* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>
 38. Legující prvky ocelí. *Knife* [online]. ©2006 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.knife.cz/Knifecz/tabid/36/ctl/Details/mid/1122/ItemID/40/Default.aspx>
 39. Vliv legujících prvků Fe-Fe₃C. *Strojírenství - vše k maturitě* [online]. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.cz/2011/03/364-vliv-legujicich-prvku-fe-fe3c.html>
 40. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. čes. vyd. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
 41. ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-718-3207-3.
 42. SANDVIK COROMANT. *Technická příručka obrábění: Příručka firmy Sandvik Coromant*. Švédsko: Elanders, 2005
 43. Trvanlivost, obrobitelnost, opotřebení břitů. *SPSVOS Brno, Sokolská* [online]. Brno, ©2014-2015 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_19-05.pdf
 44. DE VOS, Patrik a SECO TOOLS. Příručka pro technology - Jak je to s řeznými silami? *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, (3) [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html>
 45. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I.: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. 2003 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
-

-
46. HOLEŠOVSKÝ, František. *Abrazivní metody dokončování povrchů: Metodická příručka*. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., 2015. ISBN 978-80-86302-68-3.
 47. Úhel nastavení. *Sandvik Coromant* [online]. ©2000-2002 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/entering_angle/pages/default.aspx
 48. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I.: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno, 2004 [cit. 2016-04-30].
 49. Řezné podmínky. *Sandvik Coromant* [online]. ©2000-2002 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/drilling/getting_started/cutting_data/pages/default.aspx
 50. Řezné podmínky při broušení. *Mechatronika* [online]. 2013 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=39223&docGroup=-1&cmd=0&instance=2>
 51. Ekonomika, produktivita a hospodárnost obrábění: DTB Technologie obrábění. *SlidePlayer* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2584267/>
 52. VIBRACE PŘI SOUSTRUŽENÍ Zdeněk FIALA1: VIBRACE PŘI SOUSTRUŽENÍ. *Consulting point* [online]. 2012 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://cp.forever.cz/en/node/66>
 53. SANDVIK COROMANT. *Materiály: Technická příručka* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG_H.pdf
 54. ŠTULPA, Miloslav. *CNC: obráběcí stroje a jejich programování*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-207-8.
 55. Soustruhy. *ELUC* [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1221>
 56. Nulové a další vztažné body: Základy obsluhy a programování CNC strojů. *M.L. Gear Designs* [online]. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1312/nulove-a-dalsi-vztazne-body>
 57. Nulové a další vztažné body na CNC strojích. *FACTORY AUTOMATION* [online]. FANUC Czech s.r.o., ©2014 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/nulove-a-dalsi-vztazne-body-na-cnc-strojich-vyznate-se-v-nich/>
 58. *Obecný úvod do problematiky CNC programování: Studijní materiál* [online]. Velká Bíteš, ©2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: http://www.sosbites.cz/images/stories/Pro-studenty/studijni-materialy/VUKOV_TEXT_-_1.ST.pdf
 59. SANDVIK COROMANT. *Všeobecné soustružení: technická příručka* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG_A.pdf
 60. AB SANDVIK COROMANT. *Soustružnické nástroje: Obráběcí nástroje Sandvik Coromant*. Elanders, 2015.
 61. MITSUBISHI. *Novinky o produktech 2015.02*. Germany, 2015.
-

-
62. New Coated CBN Grade BC8120 for High Hardened Steel Turning. *MITSUBISHI* [online]. MITSUBISHI MATERIALS, 2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: https://www.mitsubishicarbide.com/mmc/en/whatsnew/2015_2/bc8110.html
 63. Polymorfie čistého železa. In: *DUMY* [online]. 2013 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://dumy.cz/material/131992-polymorfie-cisteho-zeleza>
 64. PRAMET TOOLS. *SOUSTRUŽENÍ: katalog*. 2014.
 65. PRAMET TOOLS. *Nové soustružnické materiály řady T9300 s MT-CVD povlakem: brožura* [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.bemet.cz/img/cms/PRAMET/Rezne-materialy/soustruznicke-materialy-T9315-T9325.pdf>
 66. WNT. *WNT MASTERTOOL PERFORMANCE: hlavní katalog*. 2014.
 67. BECKER. *CBN nástroje pro třískové obrábění: katalog*. 2011.
 68. AB SANDVIK COROMANT. *Rotační nástroje: Obráběcí nástroje Sandvik Coromant*. Elanders, 2015.
 69. Zkoušky tvrdosti. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
 70. *UP!GRADE* [online]. PRAMET Tools, ©2013 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://mx.pramet.com/prolog/upgrade/>
 71. PRAMET TOOLS. *FRÉZOVÁNÍ: katalog*. 2014.
 72. K-TOOLS. *Nástroje a technologie: katalog*. 2015.
 73. TripleCoating Si. *SHM* [online]. SHM Šumperk, ©1993-2013 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoating-si/>
 74. TripleCoating Cr. *SHM* [online]. SHM Šumperk, ©1993-2013 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoatings-cr/>
 75. MARWIN Si. *SHM* [online]. SHM Šumperk, ©1993-2013 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/marwin-si/>
 76. PRAMET TOOLS. *Nové vrtací materiály řady D8300 s PVD povlakem řady D9300 s MT-CVD povlakem: brožura UP!GRADE*. PRAMET Tools, 2013.
 77. PRAMET TOOLS. *OBRÁBĚNÍ DĚR: katalog*. 2014.
 78. MITSUBISHI. *Hlavní katalog: SOUSTRUŽNICKÉ NÁSTROJE/ROTAČNÍ NÁSTROJE*. Germany: LITHOMAN IV, 2014.
 79. *ČSN ISO 513 22 0801: Klasifikace a použití tvrdých rezných materiálů k obrábění kovů s určenou reznou hranou – Označování skupin a podskupin použití*. Praha, 2015.
 80. NORTON. *NORTON: katalog*. SAINT-GOBAIN ABRASIVES, 444 s. Dostupné také z: <http://www.brusivo-nastroje.cz/katalogy/norton/komplet/index.html>
 81. TYROLIT. *Katalog skladových výrobků pro univerzální broušení*. 2014.
-

82. DIAPraha, 2013. DIAPRAHA. *Diamantové nástroje a brusivo: katalog*. 2013.
83. *Total Materia* [online]. ©2016 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://search.totalmateria.com/Search/SubgroupList/1445606>
84. Nástrojové oceli: 90MnCrV8. *Bolzano* [online]. ©2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Nastrojove_oceli/MOP_90MnCrV8doc1.pdf
85. OBROBITELNOST MATERIÁLŮ. *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava* [online]. ©2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_06.pdf
86. CERTIFIKACE DLE ISO 14001. *CERTIFIKUJEME* [online]. ©2013 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.certifikujeme.cz/certifikace-dle-iso-14001>
87. *Hodnocení EMS ČSN EN ISO 14001:2005: dokument firmy*. 2005.
88. *Plán odpadového hospodářství: dokument firmy*. 2. 2005.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A_{c1}	°C	překryštalizační teplota
A_{c3}	°C	překryštalizační teplota
A_{Di}	mm ²	Průřez třísky odebírané jedním zubem frézy
A_{Dmax}	mm ²	Maximální velikost průřezu třísky
APS	-	Advanced Planning and Scheduling - pokročilé plánování
ARA	-	anizotermický rozpad austenitu
BL		kubický krystalický nitrid bóru s nízkým obsahem kubického nitridu bóru
CAD	-	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování
CAM	-	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba
CBN	-	kubický nitrid bóru
CM	-	smíšená keramika
CNC		Computer Numerical Control - počítačem (číslicově) řízený stroj
CVD	-	Chemical Vapour Deposition – chemické napařování z plynné fáze
ERP	-	Enterprise Resource Planning - plánování podnikových zdrojů
F_c	N	řezná síla
F_f	N	posuvová síla
F_p	N	pasivní síla
H	-	identifikační písmeno skupiny použití materiálů pro řezné nástroje
HC		kubický krystalický nitrid bóru povlakovaný
IRA	-	izotermický rozpad austenitu
L	mm	dráha nástroje
M_f	°C	martenzit finish
M_s	°C	martenzit start
MT-CVD	-	Middle Temperature Chemical Vapour Deposition – chemické napařování z plynné fáze za nižších teplot
N_c	Kč	celkové náklady na obrábění
PAG	-	polyalkylenglykol
PVA	-	polyvinylalkohol
PVD	-	Physical Vapor Deposition – fyzikální napařování
PVP	-	polyvinylpyrrolidon
R_a	μm	střední aritmetická úchylnka profilu
SK	-	slinutý karbid
S	mm ²	plocha průřezu třísky
T_{opt}	min	optimální trvanlivost břítu - při minimálních nákladech
T_{opt}	min	optimální trvanlivost břítu - při maximální výrobnosti

a_p	mm	šířka záběru ostří
b	mm	šířka třísky
f	mm	posuv na otáčku obrobku
f_k	mm	podélný posuv brousícího kotouče
f_n	mm	posuv na otáčku
f_r	mm	radiální přísuv brousícího kotouče
f_z	mm	posuv na zub
h_i	mm	tloušťka třísky
k_{c1}	$N \cdot mm^{-2}$ (MPa)	měrná řezná síla
l_{th}	mm	teoretická délka vrtání
n	min^{-1}	otáčky
t_{AS}	min	jednotkový strojní čas
v_c	$m \cdot min^{-1}$	řezná rychlost
v_e	$m \cdot min^{-1}$	rychlost řezného pohybu
v_f	$mm \cdot min^{-1}$	posuvová rychlost
K	$^{\circ}$	úhel nastavení hlavního ostří

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Křivka chladnutí a ohřevu čistého železa
- Příloha 2 Slovník pojmů
- Příloha 3 Výpočet indexu obrobitelnosti
- Příloha 4 Diagram stability
- Příloha 5 Soustružení
- Příloha 6 Řezné podmínky pro soustružení
- Příloha 7 Řezné podmínky pro frézování
- Příloha 8 Řezné podmínky pro vrtání
- Příloha 9 Řezné podmínky pro broušení
- Příloha 10 Příklady volby materiálů pro řezné nástroje z katalogů soustružení
- Příloha 11 NC program
- Příloha 12 Fotografie z výroby