

Nástrojové materiály a jejich efektivní využití

Bc. Luboš Crhan

Diplomová práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš Crhan**
Osobní číslo: **T13994**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Nástrojové materiály a jejich efektivní využití**

Zásady pro vypracování:

1. Zhodnocení současného stavu užívaných řezných materiálů
2. Vymezení základních požadavků na řezné materiály
3. Přehled řezných materiálů a jejich volby pro jednotlivé druhy obráběných materiálů
4. Specifikace výpočtu trvanlivosti nástrojů
5. Metody stanovení řezných podmínek s ohledem na zvolené kritérium optimalizace
6. Závěrečné zhodnocení výsledků a doporučení možné aplikace v praxi

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **BOUZAKIS, K. D., PARASKEVOPOULOU, R., GIANNOPOULOS, G. Multi-objective Optimization of Cutting Conditions in Milling Using Genetic Algorithms. In Proceedings of 3rd International Conference on Manufacturing Engineering. Greece. 2008. p.763773.**
2. **KOCMAN, K.: Influence of thermodynamic phenomena at the optimum cutting parameters when grinding. Manufacturing technology. 2014, 14, 1, s. 36 41. ISSN 1213-2489**
3. **KOCMAN, K.: Application of magnetic correlation analysis on the choice and cutting parameters for automated manufacturing systems. Manufacturing technology. 2011, 11, 11, s. 28 32,. ISSN 1213-2489**
4. **KOCMAN,K., PROKOP,J.: Řezné materiály pro soustružení tvrdých materiálů. Strojírenská technologie, ročník VIII, č.3, s.16-20, září 2003. ISSN 1211-4162**
5. **KOCMAN, K.: Technologické procesy - obrábění. CERM, únor 2011, s.328, ISBN 978-80-7204-722-2**

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2017

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017

Ve Zlíně dne 26. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 3.5.2017



.....

¹¹ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíží k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce je vypracovaná v rámci magisterského studijního programu Procesní inženýrství - obor Výrobní inženýrství na Fakultě technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Diplomová práce je zaměřena na problematiku jednotlivých druhů nástrojových materiálů, jejich podrobný popis, vlastnosti a použití. V první části jsou popsány základní informace o všech nástrojových materiálech. Následující části práce se zaměřují na hospodárnost při obrábění, opotřebení nástroje a výpočty optimálních řezných parametrů pro technologii soustružení při použití kritérií optimalizace.

Klíčová slova: Nástrojové materiály, technologie obrábění, slinuté karbidy, optimalizace, soustružení.

ABSTRACT

The diploma thesis is elaborated within the scope of the master study program Process Engineering - Production Engineering at the Faculty of Technology, Tomas Bata University in Zlín. The diploma thesis is focused on problems of individual types of tool materials, their detailed description, properties and use. The first part describes basic information about all tooling materials. The following sections focus on cost-effective machining, tool wear and optimal cutting parameters for turning technology using optimization criteria.

Keywords: Tool materials, technology of cutting, cemented carbides, optimization, turning.

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Karlu Kocmanovi, DrSc. za cenné rady, podklady a připomínky při zpracování diplomové práce.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	3
I TEORETICKÁ ČÁST	4
1 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY	5
1.1 NÁSTROJOVÉ OCELI.....	6
1.1.1 NÁSTROJOVÉ OCELI NELEGOVANÉ	8
1.1.2 NÁSTROJOVÉ OCELI LEGOVANÉ	8
1.1.3 NÁSTROJOVÉ OCELI VYSOKOLEGOVANÉ (RYCHLOŘEZNÉ).....	8
1.1.3.1 RYCHLOŘEZNÉ OCELI VYROBENÉ PRAŠKOVOU METALURGIÍ.....	9
1.1.3.2 POVLAKOVANÉ RYCHLOŘEZNÉ OCELI	9
1.2 STELLITY	10
1.3 SLINUTÉ KARBIDY	10
1.3.1 NEPOVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY	12
1.3.2 VÝROBA SLINUTÝCH KARBIDŮ	14
1.3.3 POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY	15
1.3.4 MODERNÍ METODY POVLAKOVÁNÍ.....	17
1.4 CERMETY	18
1.5 ŘEZNÁ KERAMIKA	21
1.6 SUPERTVRDÉ NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY	23
1.7 BROUSICÍ MATERIÁLY	25
1.7.1 STANDARDNÍ BROUSICÍ MATERIÁLY.....	25
1.7.1.1 OZNAČOVÁNÍ STANDARDNÍCH BROUSICÍCH MATERIÁLŮ	25
1.7.1.2 DOPORUČENÍ PRO VOLBU STANDARDNÍCH BROUSICÍCH MATERIÁLŮ	26
1.7.2 DIAMANTOVÉ BROUSICÍ MATERIÁLY	27
1.7.3 BROUSICÍ MATERIÁLY Z KUBICKÉHO NITRIDU BORU	28
2 PRODUKTIVITA A HOSPODÁRNOST OBRÁBĚNÍ	29
2.1 OPOTŘEBENÍ BŘITU NÁSTROJE	29
2.1.1 FORMY OPOTŘEBENÍ.....	34
2.1.2 KRITÉRIA OPOTŘEBENÍ	35
2.2 TRVANLIVOST A ŽIVOTNOST NÁSTROJE	37
2.3 OPERAČNÍ VÝROBNÍ NÁKLADY	42
2.4 OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOST BŘITU NÁSTROJE	45
2.4.1 KRITÉRIUM MINIMÁLNÍCH VÝROBNÍCH NÁKLADŮ	45
2.4.2 KRITÉRIUM MAXIMÁLNÍ VÝROBNOSTI	47
2.5 ŘEZIVOST NÁSTROJE.....	48
2.6 OBROBITELNOST MATERIÁLU	49
II PRAKTICKÁ ČÁST	52
3 OPTIMALIZACE TECHNOLOGICKÉHO PROCESU SOUSTRUŽENÍ	53

3.1	TRVANLIVOST NÁSTROJE PŘI OBRÁBĚNÍ VÍCE PRVKŮ	54
3.2	KONVENČNÍ OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PARAMETRŮ PRO SOUSTRUŽENÍ.....	57
4	VÝPOČET OPTIMÁLNÍCH ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO VÁLCOVOU PLOCHU PODLE ZADANÝCH HODNOT	62
4.1	STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOSTI PODLE KRITERIA MAXIMÁLNÍ VÝROBNOSTI:	63
4.2	STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOSTI PODLE KRITERIA MINIMÁLNÍCH VÝROBNÍCH NÁKLADŮ:	66
5	HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	70
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	74
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	76

ÚVOD [1], [2], [9]

Mezi nejčastěji používané metody obrábění kovových materiálů, které firmy na celém světě používají k výrobě strojních součástí, patří frézování, vrtání, soustružení a obrábění na obráběcích centrech. U těchto metod obrábění se při vlastní výrobě součásti odebrá z povrchu obrobku přebytečný materiál ve formě třísek, což klade vysoké požadavky na vlastnosti břitů rezného nástroje. Mezi základní požadavky na vlastnosti nástrojového materiálu patří jeho tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu a houževnatost.

Nejvíce namáhaný při procesu obrábění je břit rezného nástroje, který musí být dostatečně tvrdý, aby byla zaručena jeho dobrá řezivost a schopnost obrábět, ale zároveň také houževnatý, aby nedocházelo ke drolení a vylamování ostří. Tyto vlastnosti si rezný nástroj musí zachovat i při vysokých pracovních teplotách a tlakových namáhání, které se vyvíjejí při obrábění po dostatečně dlouhou dobu. V současné době používané rezné nástroje se vyrábějí z různých druhů materiálů a jejich použití je dáno zejména fyzikálními (měrná hmotnost, velikost zrna, součinitel tření), chemickými (chemická stabilita) a mechanickými vlastnostmi (tvrdost, modul pružnosti, pevnost v tlaku a ohybu, lomová houževnatost).

Nástrojové materiály, které mají vysokou tvrdost se používají zejména u dokončovacího obrábění, kde převládají vysoké rezné rychlosti, nízké posuvové rychlosti a malé průřezy třísek odebíraného materiálu. U této metody obrábění se vyvíjí velké množství tepla, a proto musí být rezný nástroj odolný především proti difuznímu mechanismu opotřebení. Nástrojové materiály s vysokou houževnatostí se používají pro hrubovací obrábění s většími průřezy třísek a vyššími posuvovými rychlostmi. Při hrubování musí být rezný nástroj dostatečně houževnatý, aby byl schopen odolávat vysokému mechanickému zatížení a nedocházelo k vylamování ostří, nebo drolení nástroje (adhezní a obrazní opotřebení).

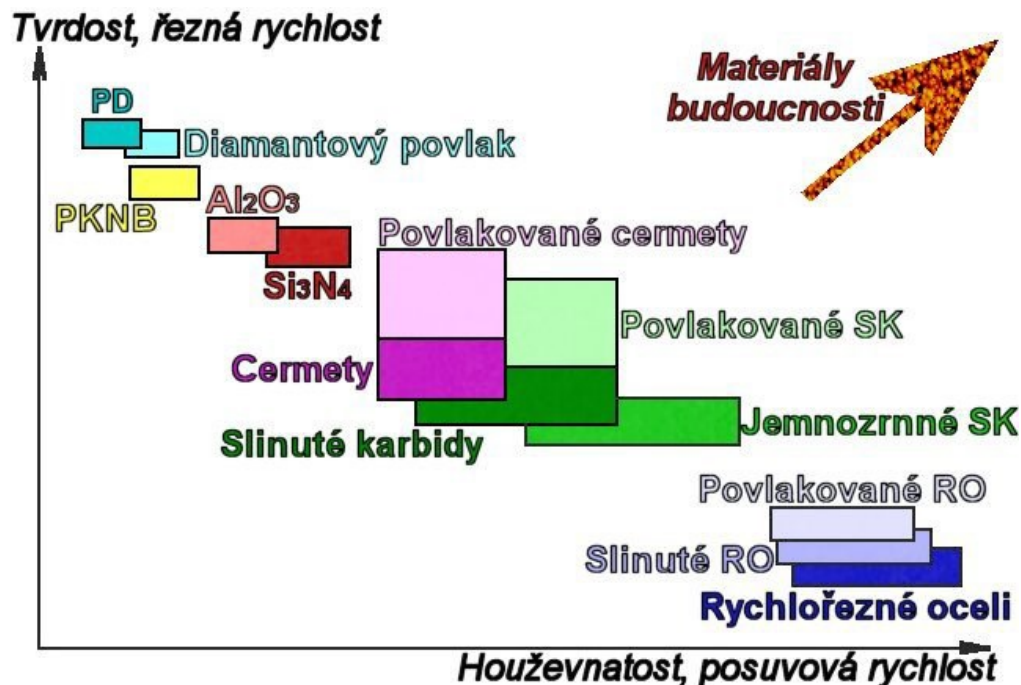
V dnešní době se při obrábění na automatizovaných výrobních linkách a obráběcích centrech nejvíce používají nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu, zejména břitové destičky s tvrdými povlaky v rozsahu cca 80 %. Zbývající rozsah tvoří především nástroje z rychlořezných ocelí, zejména nástroje osové, jako jsou vrtáky, výhrubníky, výstružníky aj. Použitelnost nástrojů a jejich nasazování do integrovaných výrobních úseků a pružných výrobních systémů je podmíněna jejich vysokou kvalitou a stabilitou parametrů, čehož se dosahuje vhodně zvoleným druhem rezného materiálu na každý typ obráběného materiálu a optimálně zvolených rezných podmínkách.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY [2], [5], [1], [4], [8], [10]

Současný poměrně široký sortiment materiálů pro řezné nástroje, od nástrojových ocelí až po syntetický diamant, je důsledkem celosvětového dlouholetého a intenzivního výzkumu a vývoje v dané oblasti a má úzkou souvislost s rozvojem konstrukčních materiálů určených pro obrábění, i s vývojem nových obráběcích strojů, zejména s číslicovým řízením.

Na obrázku č. 1.1 jsou schematicky uvedeny hlavní oblasti použití všech současných materiálů pro řezné nástroje, vyjádřené vztahem mezi základními řeznými podmínkami (řezná rychlost - posuvová rychlost), který odpovídá vztahu mezi jejich základními vlastnostmi (tvrdost - houževnatost).



Obr. 1.1 Oblasti použití jednotlivých řezných materiálů [2]

Supertvrdé materiály (polykrystalický diamant - PD a polykrystalický kubický nitrid boru - PKNB), mají vzhledem ke svým vlastnostem a vysoké ceně zcela specifické použití. Polykrystalický diamant se používá pro obrábění vlákniny vyztužených kompozitů a zejména hliníkových slitin (se zvýšeným obsahem Si, v automobilovém průmyslu), kde lze aplikovat řezné rychlosti až do hodnoty $5000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Protože diamant je uhlík v kubické modifikaci, nesmí se pro svoji vysokou afinitu k železu používat pro obrábění ocelí ani litin. PKNB je obecně doporučován pro obrábění tvrdých, kalených materiálů, s tvrdostí minimálně 45 HRC.

Řezná keramika na bázi Al₂O₃ je užívána pro obrábění vysokou řeznou rychlostí a nízkou posuvovou rychlostí, protože má vysokou tvrdost za tepla a vysokou termochemickou

stabilitu, ale nízkou houževnatost. Řezná keramika na bázi Si_3N_4 má vyšší houževnatost a vydrží vyšší posuvovou rychlost než keramika Al_2O_3 , ale její užití je omezeno na obrábění šedé litiny, protože při obrábění ocelí a tvárné litiny vykazuje rychlé opotřebení.

Cermety mohou být užity pro vyšší posuvové rychlosti než řezná keramika a pro řezné rychlosti na úrovni povlakovaných slinutých karbidů. Vzhledem k nízké houževnatosti jsou ale jejich aplikace doposud omezeny pouze na lehké a střední řezy (při vyšších posuvech se začíná projevovat jejich nižší tepelná vodivost, dochází k vyšší koncentraci tepla v oblasti špičky a tím i k rychlému plastickému porušení břitu nástroje), dobře se uplatní při obrábění korozivzdorných ocelí.

Slinuté karbidy (SK) jsou nejpevnějšími materiály mezi tvrdými nástrojovými materiály a mohou být použity pro obrábění vysokými posuvovými rychlostmi a pro těžké přerušované řezy. Nemohou být ale použity pro vysoké řezné rychlosti, zejména v důsledku své nízké termochemické stability.

Povlakované slinuté karbidy jsou složeny z pevného karbidového podkladu a termochemicky stabilního tvrdého povlaku (karbidy, nitridy, oxidy a jejich kombinace). Výsledkem jsou nejlepší materiály pro vysoké řezné i posuvové rychlosti, vysoký úběr materiálu a přerušované řezy.

Rychlořezné oceli mají nejvyšší houževnatost, ale ve srovnání s ostatními materiály je jejich tvrdost poměrně nízká. Proto jsou z nich vyráběny nástroje určené pro obrábění nízkými řeznými rychlostmi a také tvarově složité nástroje, které nemohou být vyrobeny z ostatních řezných materiálů.

1.1 NÁSTROJOVÉ OCELI

Na nástrojové oceli, podobně jako na ostatní řezné materiály jsou kladeny často protichůdné požadavky. Některé nástroje musí mít vysokou tvrdost a pevnost, u jiných se naopak tyto vlastnosti snižují, aby se získala dostatečně vysoká houževnatost. U nástrojů pracujících za tepla musí zůstat mechanické vlastnosti zachovány i za zvýšených teplot. U všech nástrojů je požadována vysoká odolnost proti abrazivnímu a adhezivnímu opotřebení, u některých i za zvýšených teplot. Nástrojové oceli musí mít také vysokou čistotu, tj. nižší obsah vměstků a rovnoměrně rozložené karbidy v matrici, aby se snížilo nebezpečí praskání nástrojů při kalení a vyštípování břitu za provozu. U ocelí na nástroje s většími průřezy

nebo složitými tvary je třeba zaručit také dostatečně velkou prokalitelnost. Nástrojové oceli se nejčastěji rozdělují podle chemického složení (tab.1.1) na:

- nelegované oceli,
- legované oceli (nizkolegované, střednělegované),
- vysokolegované oceli (rychlořezné).

Tab.1.1. Rozdělení, značení, vlastnosti a použití nástrojových ocelí [2]

OCELI		NELEGOVANÉ	LEGOVANÉ	VYSOKOLEGOVANÉ (RYCHLOŘEZNÉ)
ZNAČENÍ		19 0XX÷ 19 2XX	19 3XX÷ 19 7XX	19 8XX
OBSAH UHLÍKU[%]		0,5 ÷ 1,5	0,8 ÷ 1,2	0,7 ÷ 1,3
OBSAH LEGUJÍCÍCH PRVKŮ[%]	CELKEM	<1,0	10 ÷ 15	>30
	JEDNOTLIVÉ PRVKY	DESTINY	JEDNOTKY	AŽ DESÍTKY
LEGUJÍCÍ PRVKY		Mn, Si, Cr	Cr, Mo, V, W, Mn, Si, Ni	W, Mo, Cr, V, Co
KALICÍ PROSTŘEDÍ		VODA	OLEJ	VZDUCH
TVRDOST PO KAL.[HRC]		62 ÷ 64	66	64 ÷ 68
POUŽITÍ		RUČNÍ NÁSTROJE A NÁŘADÍ	STROJNÍ PRO NIŽŠÍ HODNOTY ŘEZ.RYCHL.	STROJNÍ NÁSTROJE

1.1.1 NÁSTROJOVÉ OCELI NELEGOVANÉ

Největší vliv na vlastnosti těchto ocelí má obsah uhlíku, kterého obsahují tyto oceli přibližně $1,05 \div 1,25\%$ C. Nástroje z nástrojových nelegovaných ocelí se používají pro řezné rychlosti do $15 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a snášejí teploty na břitu nástroje do 220°C . V dnešní době se již používají méně často a jsou nahrazovány nástroji z legovaných nástrojových ocelí. Tyto oceli se tepelně zpracovávají kalením do vody ($750 \div 770^\circ\text{C}$), nebo do oleje ($790 \div 820^\circ\text{C}$) a popouštění se provádí za teplot $100 \div 200^\circ\text{C}$. Používají se zejména pro ruční nástroje k obrábění kovů (např. pilníky), nebo pro ruční a strojní obrábění dřeva a jiných lehkobratelných materiálů. Tvrdost těchto ocelí se dosahuje kalením, kde rychlým ochlazením zpravidla do vody vznikne martenzitická struktura. Mezi hlavní nevýhody patří zejména malá odolnost břitu nástroje proti opotřebení za vyšších teplot a poměrně vysoká rychlost ochlazení při kalení, která může způsobit tvarové deformace nástroje.

1.1.2 NÁSTROJOVÉ OCELI LEGOVANÉ

Hlavními legujícími prvky u legovaných nástrojových ocelí jsou karbidotvorné prvky Cr, V, W, Mo, které vytvářejí tvrdé a stálé karbidy i při vysokých teplotách. Další legující prvky jsou Ni, Si, Co a tyto nejsou karbidotvorné. Nástrojové materiály z legovaných ocelí snášejí teplotu na břitu $250 \div 350^\circ\text{C}$ a používají se pro řezné rychlosti v rozsahu $15 \div 25 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Obsah legujících prvků zvyšuje prokalitelnost oceli a proto rychlost ochlazení při kalení může být nižší a nedochází tolik k velkým deformacím tvaru nástroje. Dále vyšší obsah legujících prvků zvyšuje celkovou tvrdost, odolnost proti opotřebení a trvanlivost ostří. Kalení se provádí do oleje za teplot $810 \div 840^\circ\text{C}$ a popouštění se provádí při teplotách $100 \div 300^\circ\text{C}$.

Používají se například pro výrobu zápustek, tvářecích nástrojů, forem na plasty, nebo pro jednoduché nástroje jako jsou výhrubníky, výstružníky, závitové čelisti, pilové listy, nástroje pro obrábění dřeva apod.

1.1.3 NÁSTROJOVÉ OCELI VYSOKOLEGOVANÉ (RYCHLOŘEZNÉ)

Rychlořezné oceli - RO, jsou pro svoje zcela specifické vlastnosti a využitelnost zejména pro vysocevýkonné řezné nástroje řazeny do samostatné skupiny legovaných nástrojových ocelí. Obsahují karbidotvorné prvky W, Cr, V, Mo a nekarbidotvorný Co. Obsah uhlíku je zpravidla menší než 1% . Podle obsahu legujících prvků a vlastností jsou vhodné pro řezné nástroje pro obrábění ocelí, ocelí na odlitky o vysoké pevnosti a tvrdosti

a obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Mají střední odolnost proti opotřebení a vysokou lomovou pevnost, což umožňuje jejich široké uplatnění.

Rychlořezné oceli mají vysoký obsah legujících prvků, které způsobují vysokou prokalitelnost těchto ocelí a ochlazovací rychlosti mohou být velmi nízké s malým vlivem na případnou deformaci nástroje. Kalení u těchto ocelí je složitější proces než je tomu u uhlíkových a legovaných nástrojových ocelí, protože u nich ochlazování probíhá stupňovitě a v několika prostředích o různé teplotě.

Nejčastěji jsou rychlořezné oceli používány pro tvarové nástroje, výstružníky, závitníky, frézy menších rozměrů, protahovací trny a nástroje vystavené velkým rázům při přerušovaných řezech. Důležitým předpokladem pro optimální využití nástrojů z rychlořezných ocelí, je použití vhodného řezného prostředí, jakými jsou řezné emulze a oleje. Rychlořezná ocel je po žíhání relativně dobře obrobitelná. Nástroje z rychlořezných ocelí snášejí teplotu na břitě $500 \div 700^\circ\text{C}$ a hodnoty používaných řezných rychlostí se pohybují nejčastěji mezi $25 \div 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Kalení se provádí na vzduchu, do oleje, nebo v termální lázni při teplotě $1210 \div 1270^\circ\text{C}$ a popouští se při teplotě $550 \div 580^\circ\text{C}$.

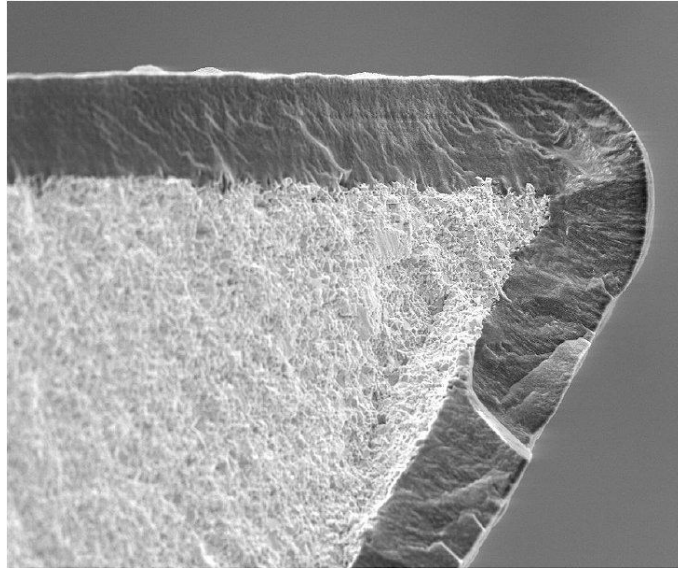
1.1.3.1 RYCHLOŘEZNÉ OCELI VYROBENÉ PRAŠKOVOU METALURGIÍ

Rychlořezné oceli vyrobené práškovou metalurgií se v poslední době používají stále častěji a mají řadu výhod proti běžným rychlořezným ocelím. Materiál má homogenní, velmi jemnou strukturu, která zvyšuje houževnatost a rovnoměrné rozložení karbidů i nekovových vměstků. Touto metodou se u nástrojů zlepšuje houževnatost, rozměrová stálost během tepelného zpracování a řezné vlastnosti. Dají se vyrobit oceli s vyšším obsahem legur a se specifickým složením, než u běžného způsobu výroby odléváním. Nevýhodou je vyšší materiálová a ekonomická náročnost při výrobě.

1.1.3.2 POVLAKOVANÉ RYCHLOŘEZNÉ OCELI

Stále častější obrábění těžko obrobitelných materiálů jako jsou například slitiny na bázi titanu, nebo niklu, způsobuje rychlejší opotřebení břitů nástrojů a snížení jejich trvanlivosti. Povlakování funkčních částí nástrojů z rychlořezných ocelí má velký ekonomický význam, protože se tím zvyšuje životnost nástroje, jeho schopnost odolávat opotřebení a tyto materiály umožňují vysokou produktivitu obrábění (tj. velký objem odebraného materiálu za jednotku času). Povlaky se nanášejí metodou PVD rozprašováním, nebo odpařováním pevného terče (Ti, Cr, Al) na nástroje ve vakuové komoře. Hlavní výhodou u této me-

tody povlakování je to, že lze povlakovat ostré hrany nástroje. Nevýhodou je složitý vakuový systém a nutnost neustálého pohybu v rotačních držácích upevněných povlakovaných nástrojů. Nejvíce používaný je povlak TiN.



Obr. 1.2 Povlakování ostrých hran metodou PVD [9]

1.2 STELLITY

Stellity jsou řezné slitiny, jejichž tvrdost a řezivost je dána přítomností velkého množství karbidů chromu a wolframu. Obsahují 2 ÷ 4 % C, 20 ÷ 40 % Cr, 10 ÷ 30% W, 30 ÷ 55% Co, dále menší množství niklu, molybdenu a dalších prvků. Přítomnost železa ve stellitech je brána jako nečistota a jeho obsah nemá být vyšší než 10%. Stellity jsou křehké, běžnými nástroji neobrobitelné, nekujné a tepelné zpracování se u nich neprovádí. Nástroje ze stellitů se odlévají, a to buď v celku, nebo jako břitové destičky a po odlití se přebrousí. Tyto nástroje byly vyvinuty počátkem 20. století, ale později byly nahrazovány slinutými karbidy, které mají mnohem lepší vlastnosti a snadněji se vyrábí.

1.3 SLINUTÉ KARBIDY

K počátku dvacátého století se váže zjištění, že výborné funkční vlastnosti rychlořezných ocelí jsou dány přítomností velmi tvrdých karbidických částic (z nichž největší význam mají částice WC) v jejich kovové matici. Významní producenti nástrojových materiálů se proto snažili vyrobit materiál, u kterého by podíl tvrdých částic byl mnohem vyšší než u tehdy běžných rychlořezných ocelí, které jich obsahovaly přibližně 30%. V důsledku omezení způsobených klasickými metalurgickými postupy odléváním však tato snaha ne-

mohla být úspěšná. Materiály s vysokým obsahem karbidických částic (90% i více), začaly být úspěšně vyráběny až po zvládnutí technologie výroby metodou práškové metalurgie.

Průmyslovou výrobu slinutého karbidu typu WC - Co (pod názvem WIDIA - Wle DI-Amant = jako diamant), rozvinula německá firma Krupp v roce 1926. Na lipském veletrhu byl v roce 1927 představen slinutý karbid Widia N (později označen podle německé normy jako G1), který obsahoval 94% WC + 6% Co. V letech 1930 ÷ 1932 byly vyrobeny slinuté karbidy Widia s obsahem 11% Co (G2) a 15% Co (G3), následoval druh H1 se stejným složením jako G1, ale s jemnějším zrnem. Řezné nástroje ze slinutých karbidů typu WC-Co, vyrobené na konci 20.let minulého století, dosahovaly velmi dobrých výsledků při obrábění litin a barevných kovů mnohem vyššími řeznými rychlostmi, než jaké byly používány u nástrojů z rychlořezných ocelí. Nebyly ale vhodné pro obrábění ocelí, protože již při řezných rychlostech mírně nad hranicí pro rychlořezné oceli u nich docházelo k rychlé tvorbě výmolu na čele a výsledná trvanlivost nástroje byla z tohoto důvodu velmi nízká. Proto byla pozornost zaměřena na další karbidy, zejména karbidy TiC, TaC a NbC. V roce 1931 se objevil první slinutý karbid na bázi dvou karbidů - Widia X (86,5% WC + 8,5% TiC + 5% Co), v roce 1932 slinuté karbidy Titanit U1 a Titanit U2 (později známé pod označením S1 a S2) se složením 77 ÷ 76% WC + 16% TiC + 2% Mo₂C + 5 ÷ 6% Co a 76 ÷ 74% WC + 14% TiC + 2% Mo₂C + 8 ÷ 10% Co. V roce 1935 byl vyroben slinutý karbid S3 s obsahem 4 ÷ 5 % TiC. Produkce slinutých karbidů všech typů rostla velmi rychle, z jedné tuny za měsíc v roce 1930 na celoněmeckou produkci 40 tun měsíčně v roce 1944.

V prvních aplikacích byl nový řezný nástroj vytvořen tak, že destičky ze slinutých karbidů byly pájeny do ocelových držáků. Změny v upevnění destičky v držáku (z pájeného spoje na konstrukci s mechanickým upínáním) se objevily v polovině 50. let 20. století, v současnosti má již drtivá většina nástrojů mechanicky upínanou vyměnitelnou břitovou destičku, nebo více destiček. Vývoj nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami měl výrazný vliv nejen na rozvoj geometrie nástroje a utvařeče třísky, ale také na rozvoj nástrojových materiálů a rozšíření jejich sortimentu (možnost použít materiály, které jdou obtížně pájet, jako jsou cermety a řezná keramika). Proto je přechod od pájených destiček k vyměnitelným právem považován za první "revoluci" v novodobých dějinách vývoje řezných nástrojů (za druhou revoluci lze považovat rychlý rozvoj povlakovacích technologií).

Podle normy ČSN ISO 513 se pro značení používají následující symboly:

- HW - nepovlakované SK na bázi karbidu wolframu WC,

- HT - nepovlakované SK (cermety) na bázi karbidu titanu TiC, nebo nitridu titanu TiN, případně kombinací obou karbidů,
- HC - SK povlakované (HW, HT).

1.3.1 NEPOVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

V současné době jsou nepovlakované slinuté karbidy pro řezné nástroje rozdělovány na základě jejich použití do těchto třech základních skupin:

- skupina **P** (barva označení modrá),
- skupina **M** (barva označení žlutá),
- skupina **K** (barva značení červená).

Jednotlivé skupiny se dále rozdělují podle houževnatosti nástrojového materiálu, např. P10, P20, P30, M10, M20, M30, K10, K20, K30 (kdy vyšší číslo vyjadřuje vyšší obsah pojícího kovu kobaltu, vyšší houževnatost a pevnost v ohybu a nižší tvrdost a ořezuvzdornost materiálu a vymezuje oblast jeho použití pro nižší řezné a vyšší posuvové rychlosti).

Podle složení se jednotlivé skupiny rozdělují následujícím způsobem (karbidy uvedené v závorkách tvoří samostatnou strukturní složku SK a jejich hlavním úkolem je zabránit růstu zrna hlavních karbidických fází):

- skupina **P**: WC + TiC + Co + (TaC.NbC),
- skupina **M**: WC + TiC + TaC.NbC + Co,
- skupina **K**: WC + Co + (TaC.NbC).

Skupina P

Je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku, jako jsou uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli. Přísada TiC zaručuje vysokou odolnost proti difuzi za vysokých teplot, která je jednou z hlavních příčin vytváření výmolu na čele nástroje. Vhodnost slinutých karbidů skupiny P pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku je dána též vyšší tvrdostí TiC (stejně TaC.NbC) za vyšších teplot, ve srovnání s WC. Nevýhodnou vlastností TiC a tuhých roztoků na bázi TiC je jejich vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazi ve srovnání s WC.

Skupina M

Má univerzální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jako jsou lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Vzhledem k relativně vysoké houževnatosti se SK této skupiny též často používají pro těžké hrubovací a přerušované řezy.

Skupina K

Je určena pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobivou třísku (zejména pro litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály). Karbid wolframu, který tvoří jedinou tvrdou strukturní složku této skupiny SK má za pokojové teploty zhruba stejnou tvrdost jako TiC, s rostoucí teplotou, ale ztrácí tvrdost rychleji než TiC. Proto jsou slinuté karbidy této skupiny nevhodné pro obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku, která mnohem více tepelně zatěžuje čelo nástroje (dlouhá tříška má větší plochu styku s čelem nástroje a doba jejího kontaktu s nástrojem je delší).

Z běžných slinutých karbidů K, P, M je pouze omezený počet druhů užíván pro lehké a dokončovací obrábění (vysoká řezná rychlost, nízká posuvová rychlost a hloubka řezu). Druhy s vyšším číselným označením jsou obvykle používány pro střední a těžké obrábění nebo hrubování, lze je také užít pro frézování a vrtání. Při nepřerušovaném řezání mají slinuté karbidy s nižším obsahem pojící fáze (zařazené do skupin s nižším číselným označením) lepší řezivost vzhledem k větší odolnosti proti plastické deformaci.

Tab. 1.2 Složení a vlastnosti slinutých karbidů podle rozdělení ISO [2]

Označení	Složení [%]			Měrná hmotnost [g cm ⁻³]	Tvrdość [HV]	Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pruž- nosti v tahu [GPa]	Teplotná vodi- vost [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Koeficient délkové roz- tažnosti [10 ⁻⁶ K ⁻¹]
	1) - ve většině případů obsahuje 5 ÷ 40% NbC									
	WC	TiC+TaC ¹⁾	Co							
P01.2	30	64	6	7,2	1800	750	3500			
P01.3	51	43	6	8,5	1750	900	4200	460	17	7,5
P01.4	62	33	5	10,1	1750	1000	4100	480	17	7,5
P05	77	18	5	12,2	1700	1100	4300			6,0
P10	63	28	9	10,7	1600	1300	4600	530	29	6,5
P20	76	14	10	11,9	1550	1500	4800	540	34	6,0
P25	71	20	9	12,4	1450	1750	4800	550	42	6,0
P30	82	8	10	13,1	1500	1700	5000	560	59	5,5
P40	75	12	13	12,7	1400	1900	4900	550	59	5,5
P50	68	15	17	12,5	1300	2100	4000	520	54	
M10	84	10	6	13,1	1750	1350	5000	580	50	5,5
M20	82	10	8	13,4	1550	1600	5000	570	63	5,5
M30	81	10	9	14,4	1450	1800	4800	550	63	5,5
M40	79	6	15	13,6	1300	2100	4400	540	67	6,0
K01	92	4	4	15,0	1800	1200	5900	670	84	4,5
K05	91	3	6	14,5	1750	1400	5900	650	80	5,0
K10	92	2	6	14,8	1600	1500	5700	630	80	5,0
K20	93	1	6	14,8	1550	1700	5200	620	80	5,0
K30	90	1	9	14,4	1450	1900	4700	580	71	5,3
K40	87	1	12	14,2	1300	2100	4500	570	67	5,5

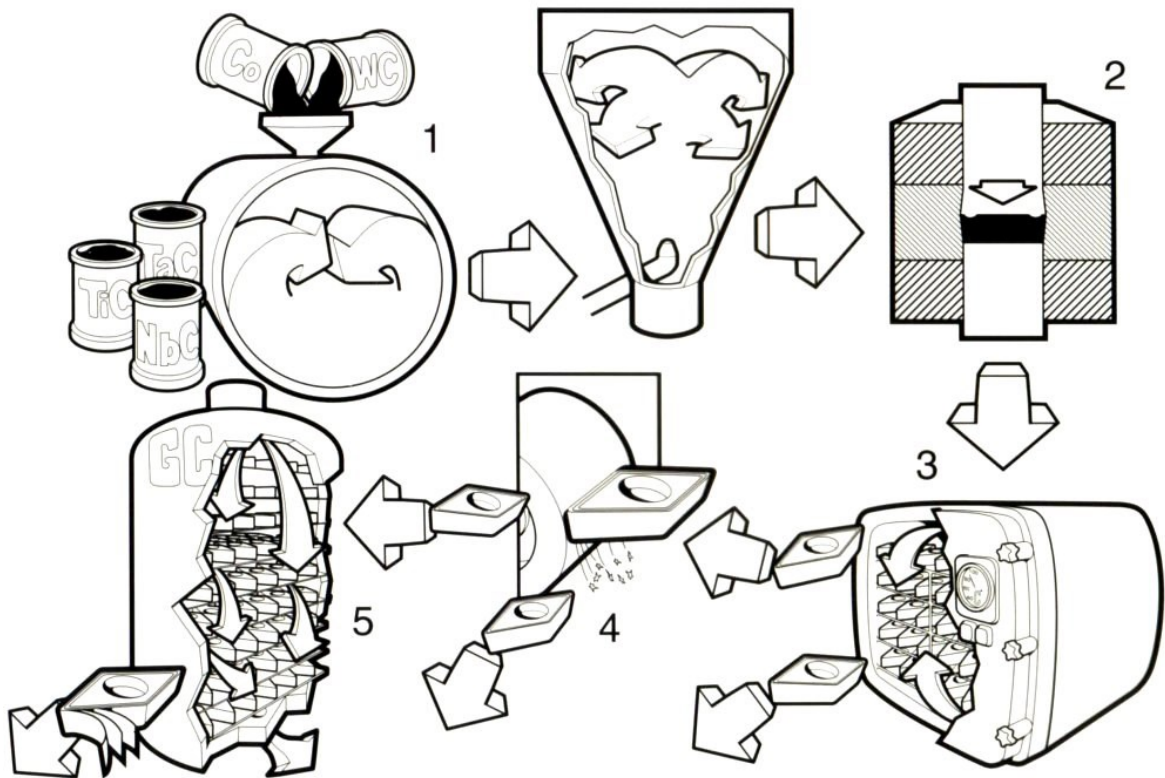
1.3.2 VÝROBA SLINUTÝCH KARBIDŮ

Obecný postup výroby slinutých karbidů lze na základě obrázku č.1.3 rozdělit do následujících základních operací:

- výroba práškového wolframu,
- výroba práškových karbidů (WC, TiC, TaC.NbC) a kobaltu,
- příprava směsí uvedených prášků - 1,
- formování směsí - 2,
- předslinování zformovaných směsí (kolem 1000 °C) - tato operace je většinou spojena s operací slinování,
- úprava tvaru předslinutého tělesa (v případě potřeby),
- slinování (1350 ÷ 1650 °C) - 3,
- vysokoteplotní izostatické lisování (HIP - Hot Isostatic Pressing), kdy probíhá slinování za vysokých teplot a působení tlakového plynu, který zajistí rovnoměrný tlak na slinovaný výrobek ze všech směrů. Takto vyrobené slinuté karbidy mají vysokou hustotu, která se

blíží teoretické hodnotě, s minimálním objemem pórů a jiných vad a při aplikacích pro různé nástroje proto dosahují nejvyšších hodnot trvanlivosti.

- Dodatečné úpravy povrchu (broušení - 4, povlakování - 5).



Obr. 1.3 Výroba slinutých karbidů [2]

1.3.3 POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

První povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu pro obrábění vyrobila firma Sandvik Coromant v roce 1969 (materiál GC125, povlak TiC, tloušťka vrstvy $4 \div 5 \mu\text{m}$). S malým časovým odstupem následovaly povlaky typu TiN a TiCN, povlaky Al_2O_3 přišly na trh v polovině 70. let 20. století. Otěruvzdorné vrstvy byly vytvářeny na podkladech z běžných SK metodou CVD, jako jedno i vícevrstvé. Povlaky PVD se jako otěruvzdorné vrstvy na břitových destičkách ze slinutých karbidů začaly používat na začátku 80. let. Nejužívanějším povlakem PVD byl jednovrstvý TiN. V odborné literatuře jsou obvykle uváděny tyto vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů:

- **1. generace** - jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou asi $7 \mu\text{m}$ a špatnou soudržností podkladu a povlaku (tato nepříznivá vlastnost byla způsobena nedokonalou technologií výroby, kdy mezi podkladem a povlakem docházelo k tvorbě křehkého eta-karbidu),

- **2. generace** - jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN) bez etakarbidu na přechodu podklad - povlak. Zdokonalení technologie výroby umožnilo vytvořit vrstvy povlaků o větší tloušťce (až 13 μm), bez nebezpečí jejich odlupování při funkci nástroje.
- **3. generace** - vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které mají relativně nižší odolnost proti opotřebení a jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu. Nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v tomto pořadí (od podkladu k povrchu): TiC - Al₂O₃, TiC - TiN, TiC - TiCN - TiN, TiC - Al₂O₃ - TiN, TiCN - Al₂O₃ - TiN.
- **4. generace** - speciální vícevrstvý povlak (velmi často i více než 10 vrstev a mezivrstev), s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami (užívají se stejné materiály povlaků jako u 3. generace). Výroba takového povlaku je umožněna cíleným řízením atmosféry v povlakovacím zařízení, podle potřeb technologického postupu povlakování.


Povlakované slinuté karbidy jsou vyráběny tak, že na podkladový materiál (původně běžný SK typu K, P, nebo M, dnes speciální SK) se nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení (povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost, než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě). Tyto výhodné vlastnosti vyplývají zejména z toho, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů (póry, dutiny) a tvoří bariéru proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje. Podle principu se metody povlakování dělí do dvou základních skupin CVD a PVD.

Metoda CVD

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze) probíhá za vysokých teplot (900 ÷ 1200 °C). Tato metoda byla až do začátku 90. let 20. století hlavní metodou povlakování slinutých karbidů. K jejím výhodám patří výborná adheze mezi podkladem a povlakem, možnost nanesení vrstev o větší tloušťce (10 ÷ 13 μm), povlakování předmětů složitějších tvarů, všestranný účinek a variabilita typů povlaků. Za nevýhody lze považovat ovlivnění podkladového materiálu (snížení ohybové pevnosti), nemožnost napovlakovat ostré hrany a tahová zbytková napětí v povlaku.

Metoda PVD

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování) je charakteristická nízkými pracovními teplotami (podle některých údajů pod 600 °C, 350 °C, nebo dokonce 180 °C). Tato metoda byla původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí (nízká teplota zaručuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění materiálu), ale v současné době je ve velkém rozsahu používána i u břitových destiček ze slinutých karbidů určených pro přerušovaný řez (frézování). Vytváří tlaková zbytková napětí v povlaku, nemá nepříznivý vliv na vlastnosti podkladu a je schopna povlakovat i ostré hrany, na druhé straně vyžaduje mnohem důkladnější přípravu povrchu vzorku před povlakováním (odmašťování, čištění) a má směrový účinek (plochy, které jsou odvrácené od místa odpařování povlakového kovu by bez neustálého pohybu vzorku zůstaly zcela bez povlaku). K dalším nevýhodám patří tenčí vrstva povlaku (kolem 5 μm) a menší možnosti výběru typu povlaku.

	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrдость	Tvrдость za tepla
Nejlepší	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
	TiN	TiN	Al ₂ O ₃	TiN
	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
	TiC	TiC	TiN	TiC
	Špatná			

Obr.1.4 Základní vlastnosti vybraných povlaků [2]

1.3.4 MODERNÍ METODY POVLAKOVÁNÍ

V souladu s vývojem na konci 80. let minulého století jsou dnes u vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů nejčastěji používány povlaky čtvrté nebo třetí generace. K původním materiálům pro jednotlivé vrstvy (TiC, TiN, TiCN, Al₂O₃), přibývají další nové materiály, jako např. CrN, HfN, ZrN, TiZrN, TiAlN, Ti₂N, TiAlSiN, AlTiN, TiN/TaN, TiN/NbN, TaC, ZrC, HfC, TaN, TaCN, (Ti-Cr)CN, TiC+TiB₂, CrC, B₄C, Al₂O₃ + ZrO₂, SiO₂, TiO₂, MgO, Y₂O₃, některé z nich se ale prozatím nedostaly do stadia sériové výroby a praktického použití.

Významnou roli při zvyšování výkonů řezných nástrojů hrají i tzv. lubrikační povlakové vrstvy, např. MoS_2 , vytvořené metodou PVD. Jejich nejdůležitější funkcí je výrazně snížit tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou (nižší tepelné zatížení nástroje se pak projeví ve zvýšení jeho trvanlivosti). Velký zájem výrobců je soustředěn též na vývoj a sledování vlastností povlaků z polykrystalického diamantu, jen velmi sporadicky se vyskytují práce, zabývající se povlaky z PKNB.

Zásadní kvalitativní změnu v technologii vytváření tenkých otěruvzdorných vrstev přinesla tzv. plazmaticky aktivovaná CVD metoda (označení PCVD, nebo též PACVD - Plasma CVD, PECVD - Plasma Enhanced CVD, MWPCVD - MicroWave Plasma CVD, mikrovlnná plazmatická CVD metoda), která se od klasické CVD metody liší nízkými pracovními teplotami (běžně $600\text{ }^\circ\text{C}$, podle některých údajů i méně, např. $480 \div 560\text{ }^\circ\text{C}$), přičemž nemění její princip, tj. vytváření povlaku z plynné fáze. Metoda PCVD je založena na zvýšení energie plynné atmosféry v povlakovací komoře pomocí její ionizace a aktivace v plazmatickém výboji. Takováto chemicky aktivovaná plazma umožňuje snížit teplotu potřebnou pro ukládání povlaku na povrchu substrátu.

Vysokou trvanlivost a s ní spojené vysoké úběry obráběného materiálu dosahují břitové destičky ze slinutých karbidů s tzv. nanokompozitními povlaky, které jsou založeny na principu pravidelného střídání dvou typů vrstev s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi (tloušťky jednotlivých „monovrstev“ jsou přitom velmi malé, kolem 10 nm). Tyto povlaky jsou složeny z více druhů materiálů, jejichž vzájemná rozpustnost je minimální. Při optimálním poměru jednotlivých složek je vytvořena termodynamicky stabilní struktura s unikátními fyzikálními vlastnostmi, např. u systému $\text{TiN} - \text{Si}_3\text{N}_4$ může tvrdost povlaku dosáhnout hodnoty HV vysoko nad 50 GPa .

1.4 CERMETY

Název CERMET vznikl složením prvních tří hlásek slov "CERamics (keramika)" a "METal (kov)" a měl tak vyjadřovat nástrojový materiál, jehož mechanické vlastnosti vykazují požadovanou kombinaci vysoké tvrdosti (jakou mají keramiky) a vysoké houževnatosti (jakou mají kovy). Přestože se původní očekávání na dosažení uvedených vlastností zcela nenaplnila, je tento název používán dodnes, i když lze v odborné literatuře najít i jiné, méně frekventované názvy, jako např. slinuté karbonitridy nebo bezwolframové slinuté karbidy. Základní složení cermetů je:

- TiC + TiN + Ni, Mo.

První cermety použitelné pro řezné nástroje byly vyvinuty v USA již v polovině 50. let 20. století, ale v důsledku své nedostatečné houževnatosti však nevyvolaly velkou pozornost ani v USA ani v Evropě. Naproti tomu vzbudily velký zájem v Japonsku jako levný a lehce dostupný materiál pro řezné nástroje, protože neobsahují deficitní prvky jakými jsou wolfram a kobalt. Jejich vývoj až na dnešní úroveň byl tedy prováděn především v Japonsku (na konci 80.let tvořily cermety v japonském průmyslu téměř jednu třetinu všech užívaných břitových destiček, což byl objem prakticky shodný s objemem destiček z povlakovaných slinutých karbidů).

Hlavní výhodou cermetů je jejich vysoká tvrdost, která zůstává zachována i při použití za zvýšených teplot, kdy si lépe udržují svůj tvar než slinuté karbidy. Jsou levnější než SK, mají vyšší chemickou stabilitu, odolnost proti oxidaci a tvorbě nárůstku. Jejich hlavní nevýhodou je nízká houževnatost, která je sice neustále zvyšována, ale přesto nedosahuje hodnot obvyklých u slinutých karbidů. V důsledku vynikající odolnosti proti adhezi a nízké náchylnosti TiC a TiN k reakci s obráběným ocelovým materiálem (ve srovnání s WC), jsou cermety velmi rozšířenými řeznými materiály pro dokončovací obrábění ocelí, kde jsou schopny vytvořit plochy s velmi nízkou drsností povrchu. S výhodou je lze použít i pro obrábění korozivzdorných ocelí, kde vykazují vyšší trvanlivost než nepovlakované slinuté karbidy, nemohou být používány pro obrábění žáruvzdorných slitin s vysokým obsahem niklu. Analýza použití cermetů a srovnání s ostatními materiály pro řezné nástroje, je uvedena v tabulce č.1.3.

Tab.1.3 Použití cermetů [2]

Nástrojový materiál	Aplikace	Analýza
PD	Obrábění slitin hliníku vysokými řeznými rychlostmi. Neželezné kovy a nekovové materiály.	Lze použít cermety, ale při nižších řezných rychlostech; náklady na jeden břit jsou při jejich použití výrazně nižší.
PKNB	Tvrdé obrobky a obrábění šedých litin vysokými řeznými rychlostmi.	Nelze obrábět pomocí cermetů při stejných rychlostech; náklady na jeden břit jsou u cermetů výrazně nižší.
Řezná keramika lisovaná za studena	Vysokorychlostní soustružení a zapichování oceli a litin.	Cermety jsou univerzálnější a levnější, ale nemohou pracovat při vysokých řezných rychlostech.
Řezná keramika lisovaná za tepla	Soustružení a zapichování tvrdých obrobků, vysokorychlostní dokončovací obrábění oceli a litin.	Tvrdé obrobky nelze obrábět pomocí cermetů; oceli a litiny nelze obrábět při stejných rychlostech; cermety jsou univerzálnější a levnější.
Řezná keramika Si_3N_4	Hrubovací a polohrubovací soustružení a frézování šedých litin vysokými řeznými rychlostmi za nepříznivých podmínek.	Pomocí cermetů nelze obrábět šedé litiny při stejných řezných rychlostech, ale při středních rychlostech mohou být levnější.
Povlakované SK	Obecné použití pro obrábění oceli (včetně korozivzdorných), šedých litin, atd.	Cermety mohou pracovat při vyšších řezných rychlostech, mají vyšší trvanlivost a jsou levnější při pohrubovacích a dokončovacích operacích.
Slituté karbidy	Houževnaté nástrojové materiály pro nižší řezné rychlosti a různé obráběné materiály.	Cermety mohou pracovat při vyšších rychlostech, zaručují lepší obrobenou plochu.

Cermety nabízejí výhody vyšších řezných rychlostí ve srovnání s konvenčními SK, protože TiC je termochemicky stabilnější než WC. Užití první generace cermetů TiC - Mo-Ni bylo však omezeno pouze na oblast lehkého řezání, protože jejich houževnatost a odolnost proti vydrolování byly ve srovnání s běžnými SK nižší. Tyto materiály byly z trhu řezných nástrojů postupně vytlačeny a v současnosti nejsou již téměř používány.

Hlavní pozornost při dalším vývoji cermetů byla věnována zvýšení pevnosti a odolnosti proti vydrolování. Tyto vlastnosti byly zlepšeny přidáním TaC a WC. Výsledkem bylo rozšíření oblasti užití na soustružení středními hodnotami posuvové rychlosti a lehké frézování. To upevnilo pozici cermetů v oblasti soustružení a hlavní aplikace druhé generace cermetů byla zaměřena na obrábění nižší řeznou rychlostí a vyšší posuvovou rychlostí, na rozdíl od obrábění vysokými rychlostmi, doporučeného v počátečním období používání těchto nástrojů.

Třetí generace cermetů je založena na kombinaci TiC - TiN, podíl TiC začal být v polovině 70. let postupně nahrazován nitridem nebo karbonitridem titanu (přidáním TiN se zmenšila velikost zrn tvrdé fáze a vzrostla tvrdost). Ve srovnání s předchozími generacemi mají tyto materiály nižší pórovitost, vyšší houževnatost a odolnost proti opotřebení a vydrolování. Většina v současné době používaných cermetů je vyráběna na bázi TiC - TiN.

1.5 ŘEZNÁ KERAMIKA

Keramika je obecně charakterizována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Tato definice zahrnuje nejen tradiční keramiku (porcelán, cement, cihly), ale i řezné a brousící materiály a řadu tzv. "nových" (speciálních, konstrukčních, strojírenských, průmyslových, pokrokových, příp. jinak nazývaných) keramických látek. Pro novou keramiku je charakteristické to, že je vyráběna z poměrně čistých surovin jako keramika syntetická. Většina látek zařazovaných pod pojem "nová keramika" jsou látky krystalické na rozdíl od tradiční keramiky (např. porcelán, glazury), která obsahuje i značný podíl skelné (amorfní) fáze. Keramické látky jsou vázány meziatomovými vazbami iontovými a kovalentními, jejich vazba není ale čistě iontová nebo čistě kovalentní, obvykle se vyskytují oba typy vazby současně. V krystalové struktuře převažují složité mřížky kubické a hexagonální.

K základním vlastnostem polykrystalických keramických materiálů patří malý rozměr zrna (velmi často pod 1 μm), vysoká tvrdost, nízká houževnatost (důvod zvýšené křehkosti) a nízká měrná hmotnost (tabulka č.1.4 uvádí porovnání vybraných vlastností řezných keramik, slinutého karbidu a cermetů).

Tab 1.4 Vybrané vlastnosti nástrojových materiálů [2]

Vlastnost	Nástrojový materiál					
	Slinutý karbid WC+Co	Cermet MO ₂ C +TiCN+Ni	Al ₂ O ₃ +ZrO ₂	Al ₂ O ₃ +TiC	Si ₃ N ₄ + přísady	
Měrná hmotnost [g cm ⁻³]	12,0 ÷ 15,1	5,6 ÷ 7,0	3,8 ÷ 4,0	4,2 ÷ 4,3	3,2 ÷ 3,4	
Pevnost v ohybu [MPa]	1000 ÷ 2400	1150 ÷ 1800	600 ÷ 800	600 ÷ 900	600 ÷ 950	
Tvrdost	[HV]	1900	2000	1600 ÷ 2200	1000 ÷ 2400	1800 ÷ 2000
	[HRA]	90 ÷ 92	91 ÷ 93	91 ÷ 94	93 ÷ 95	86 ÷ 95
Modul pružnosti v tahu [GPa]	520 ÷ 660	500	340 ÷ 400	370 ÷ 420	300 ÷ 380	
Souč. délkové roztažnosti [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	4,5 ÷ 7,0	7,0 ÷ 7,5	7,0 ÷ 8,5	1,5 ÷ 3,5		
Měrná tepelná vodivost [W m ⁻¹ K ⁻¹]	80	30	20 ÷ 30	20 ÷ 25	30 ÷ 50	
Lomová houževnatost [MPa m ^{1/2}]	10 ÷ 17	10	4 ÷ 6		5 ÷ 7	

Keramické materiály, které se používají pro výrobu vyměnitelných břitových destiček řezných nástrojů, jsou obvykle rozdělovány následovně:

- oxidická keramika - čistá (čistý Al₂O₃),
 - polosměsná (Al₂O₃+ZrO₂, Al₂O₃+ZrO₂+CoO),
 - směsná (Al₂O₃+TiC, Al₂O₃+ZrO₂+TiC, Al₂O₃+TiC+TiN),
- nitridová keramika (Si₃N₄, Si₃N₄+ Y₂O₃, Si₃N₄+TiN, sialony),

- vyztužená keramika (oxidická nebo nitridová keramika vyztužená pomocí whiskerů SiC nebo Si₃N₄).

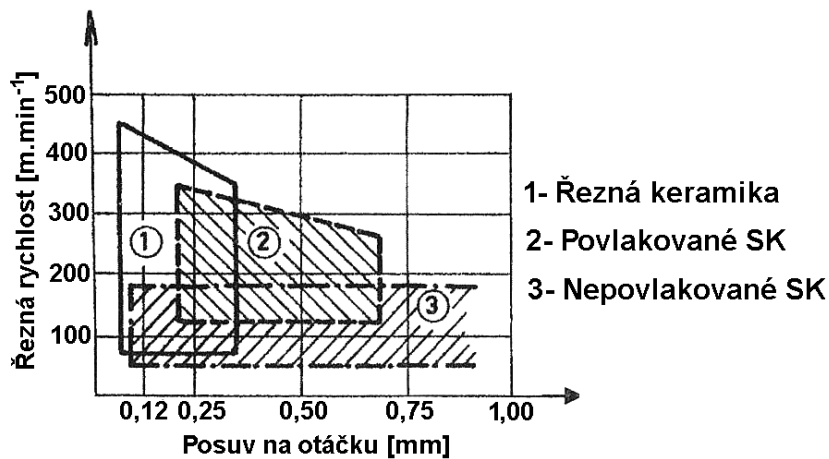
První čisté oxidické keramické materiály (na bázi Al₂O₃), které se úspěšně používaly pro řezné nástroje, se na trhu objevily koncem 50. let 20. století. Obsahovaly Al₂O₃ a malé množství (obvykle 1%) slinovacích přísad, např. MgO. Pevnost v ohybu se pohybovala v rozsahu 400 ÷ 500 MPa, lomová houževnatost dosahovala hodnot $K_{IC} = 3 \div 4 \text{ MN m}^{-3/2}$. Oxid hlinitý má nejvyšší termochemickou stabilitu mezi nástrojovými materiály a vykazuje vynikající odolnost proti opotřebení při obrábění vysokými řeznými rychlostmi.

Keramiky typu Al₂O₃ - TiC vyráběné metodou vysokoteplotního lisování byly vyvinuty začátkem 70. let a měly zlepšit odolnost proti vydrolování a spolehlivost keramických řezných nástrojů. Ohybová pevnost vzrostla na 1000 MPa a lomová houževnatost na 4 ÷ 5 $\text{MN m}^{-3/2}$, značně byla zvýšena odolnost proti vydrolování ostří. Jde o dnes nejrozšířenější řeznou keramiku, která se významně zasloužila o vstup keramických materiálů na trh řezných nástrojů. Slinovací proces byl postupně změněn z vysokoteplotního lisování na vysokoteplotní izostatické lisování (HIP), aby se snížila cena a zvýšila produktivita.

V polovině 80. let byly vyvinuty kompozity Al₂O₃ vyztužené vlákny SiC (whiskery), v rozsahu 20 až 30 % objemu materiálu. Jejich ohybová pevnost je stejná jako u keramik typu Al₂O₃ - TiC, lomová houževnatost je mnohem vyšší, kolem 9 $\text{MN m}^{-3/2}$. Přidáním vláken SiC se značně zvýší odolnost proti vydrolování a vylamování ostří v důsledku mechanického zpevnění a vyšší odolnosti proti oxidaci. Výsledkem jsou vynikající řezné výkony těchto materiálů při obrábění superslitin, kde nevyztuženým keramickým materiálům hrozí nebezpečí porušení právě v důsledku vydrolování a vylamování ostří.

Whiskery zlepšují mechanické vlastnosti kompozitu zejména proto, že brání šíření trhlin a to z následujících důvodů:

- při uvolňování vláken, která jsou rovnoběžná s rovinou trhliny dochází k odklonu směru šíření trhliny,
- vlákna kolmá k rovině trhliny se porušují v rovině trhliny, nebo několik mikrometrů od ní,
- vlákna, která se nacházejí v bezprostřední blízkosti zrn matrice, vytvářejí účinné zpevňovací můstky (pouze v případě, kdy je jejich délka minimálně dvakrát větší, než je rozměr zrn).



Obr. 1.5 Oblasti ekonomického použití řezných podmínek u vybraných nástrojů [1]

1.6 SUPERTVRDÉ NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Pod všeobecný název supertvrdé materiály lze zahrnout dva synteticky vyrobené materiály, a to polykrystalický diamant (PD) a polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB). Vzhledem k vynikajícím mechanickým vlastnostem (pevnost v tlaku, tvrdost) lze PD i PKNB s výhodou použít jako řezné nástrojové materiály pro speciální aplikace.

Tab. 1.5 Vlastnosti supertvrдых materiálů [2]

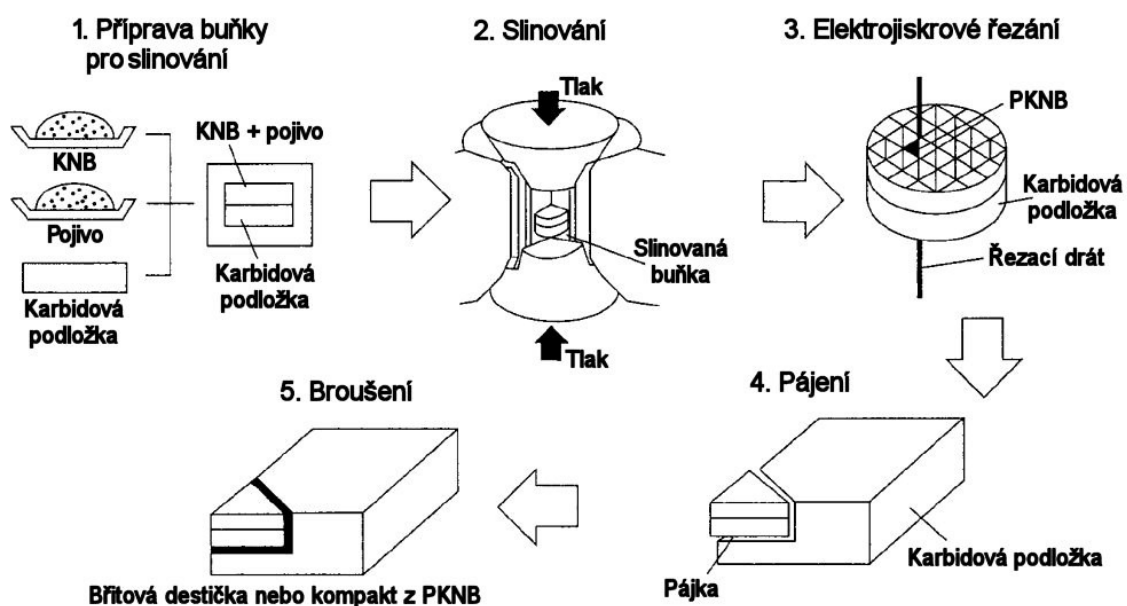
Vlastnost	Diamant		PKNB
	monokrystal	polykrystal	
Měrná hmotnost [g cm^{-3}]	3,52	3,6 - 4,1	3,4 ÷ 4,3
Délka strany kubické mřížky [nm]		0,3567	0,3616
Pevnost v tlaku [GPa]		4,7	3,8
Mikrotvrdost [HV]	12000	7000 ÷ 10000	5000 ÷ 8000
Modul pružnosti v tahu [GPa]		925	680
Modul pružnosti ve smyku [GPa]		430	280
Lomová houževnatost K_{IC} [$\text{MN m}^{-3/2}$]		8,0	5,0
Poissonova konstanta [-]		0,09	0,22
Koeficient délkové roztažnosti při 200 °C [10^{-6}K^{-1}]	2,5	4,0	4,9
Měrná tepelná vodivost [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]		120	100 ÷ 600
Teplotní stálost [°C]		700 ÷ 800	1500 ÷ 1600

Protože diamant má poměrně nízkou teplotní stálost (při dosažení teplot nad 800 °C se mění na grafit), nesmí být používán pro obrábění materiálů na bázi železa (oceli, litiny), kde by při nadměrném ohřevu docházelo k silné difuzi mezi nástrojem a obráběným materiálem a tím i k velmi rychlému opotřebení v důsledku probíhajících chemických reakcí, hlavně na čele nástroje.

Aplikační možnosti PD při obrábění neželezných materiálů jsou naopak velmi široké. Hliníkové slitiny (v některých případech lze použít řezné rychlosti, které přesahují hodnotu $5000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$), zejména s vysokým obsahem křemíku, který působí na nástroj velmi silným abrazivním účinkem, bronzy, mosazi, kompozity vyztužené různými druhy vláken (skleněná, uhlíková, aramidová - Kevlar, polyetylenová, atd.), titan a jeho slitiny, keramika, grafit, tvrdé přírodní materiály (žula, mramor, apod.).

Pro obrábění diamantovými nástroji je doporučováno chlazení běžnými řeznými kapalinami, na které nejsou kladeny žádné speciální požadavky. Je však požadováno, aby oběhové čerpadlo bylo schopno dodávat kapalinu do místa řezu pod vysokým tlakem. Protože nástroje z PD pracují obvykle za vysokých řezných rychlostí, musí mít použitý obráběcí stroj vysoký výkon a tuhost, a s ohledem na vysoké úběry obráběného materiálu je též třeba pamatovat na efektivní odstraňování třísek z místa řezu.

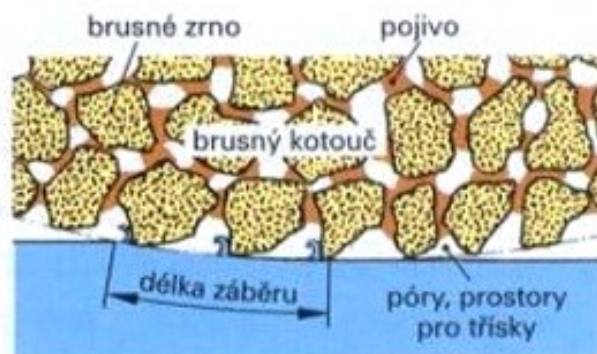
Průmyslově je diamant vyráběn z velmi čistého grafitu, kubický nitrid boru z nitridu boru. Grafit i nitrid boru (někdy též nazýván „bílý grafit“) mají hexagonální mřížku a podobají se i některými vlastnostmi, jako je velmi nízká tvrdost, nízký koeficient tření a dobrá elektrická vodivost. Působením vysoké teploty a tlaku se hexagonální mřížka grafitu i nitridu boru transformuje na mřížku kubickou. Velká deformace mřížky je důvodem vzniku velkých vnitřních napětí, což se navenek projeví velmi vysokou tvrdostí vyrobeného diamantu a kubického nitridu boru. Postup výroby břitových destiček z PKNB je schématicky uveden na obrázku č. 1.6.



Obr. 1.6 Postup výroby vyměnitelné břitové destičky z PKNB [2]

1.7 BROUSICÍ MATERIÁLY

Základní část brousicích materiálů tvoří brousicí zrna, která se používají buď ve formě volných zrn (brousicí, lapovací a leštící prášky), zrn nanesených a přilepených k pružnému podkladu (brousicí a leštící plátna a papíry), zrn rozptýlených v mazadlech a tekutinách (brousicí a leštící pasty), nebo nejčastěji zrn spojených pojivou v tuhá tělesa potřebného tvaru (brousicí kotouče a segmenty).



Obr. 1.7 Schématické znázornění stavby brousicího kotouče [11]

V technické praxi se používají standardní brousicí materiály (na bázi kysličníku hlinitého Al_2O_3 a na bázi karbidu křemíku SiC), nebo diamantové brousicí materiály a brousicí materiály z kubického nitridu bóru.

1.7.1 STANDARDNÍ BROUSICÍ MATERIÁLY

Brousicí materiály typu Al_2O_3 (umělý korund, elektrik) a brousicí materiály typu SiC (karbidsilicium, karborundum) patří k technologicky nejrozšířenějším. Volba jednotlivých vlastností brousicího kotouče se volí zejména s ohledem na druh obráběného materiálu, jeho fyzikálně - mechanické vlastnosti, tepelné zpracování a požadovanou strukturu povrchové vrstvy po broušení, zejména drsnost povrchu a možnost vzniku reziduálního napětí.

1.7.1.1 OZNAČOVÁNÍ STANDARDNÍCH BROUSICÍCH MATERIÁLŮ

Brousicí materiál charakterizuje druh brousicího materiálu, zrnitost, tvrdost, struktura a druh pojiva. Příklad označení standardního brousicího materiálu je:

- A 36 L 5 V,

kde: A - kysličník hlinitý (Al_2O_3 , umělý korund),

- 36 - zrnitost (střední),
- L- tvrdost (střední),
- 5 - struktura (polohutný),
- V - pojivo V (keramické).

1.7.1.2 DOPORUČENÍ PRO VOLBU STANDARDNÍCH BROUSICÍCH MATERIÁLŮ

Druh brousicího materiálu

Volí se na základě vlastností materiálu obrobku. Umělý korund pro ocel, ocel na odlitky, temperované litiny, tvrdé bronzy. Karbid křemíku pro šedou litinu, mosaz, měď, lehké kovy a jejich slitiny, slinuté karbidy, sklo a keramiku.

Zrnitost brousicího materiálu

Volí se s ohledem na požadovanou drsnost broušeného povrchu. Čím jsou kladeny větší požadavky na drsnost povrchu obrobku, tím je potřeba jemnější zrnitost brousicího kotouče. Naopak pro větší úběr materiálu, nebo při broušení mědi, mosazi a hliníku se volí hrubší zrnitost. Zrnitost brousicího kotouče může být velmi hrubá, hrubá, střední, jemná, velmi jemná, zvláště jemná.

Tvrdost brousicího materiálu

Tvrdost je charakterizovaná soudržností hmoty brousicího nástroje. V souvislosti s uvolňováním otupených brousicích zrn z nástroje se pro tvrdší materiály obrobků volí měkkí materiály brousicích nástrojů. Tvrdost se značí velkými písmeny abecedy a může být velmi měkká, měkká, střední, tvrdá a velmi tvrdá.

Struktura brousicího materiálu

Struktura (sloh), vyjadřuje vzdálenost mezi jednotlivými brousicími zrny, nebo také hutnost brousicího nástroje. Hutné brousicí materiály se volí pro broušení tvrdých a křehkých materiálů obrobků. Pro broušení houževnatých materiálů jsou vhodné brousicí materiály méně hutné - pórovité. Zvláště pórovité kotouče jsou vhodné pro broušení součástí, které se nesmí broušením příliš ohřívat. Struktura může být velmi hutná, hutná, střední, otevřená, velmi otevřená, zvláště pórovitá a vysokoporézní.

Pojivo brousícího materiálu

Pojivo vytváří spojení mezi jednotlivými brousícími zrnky a jeho vlastnosti významně ovlivňují tzv. samoostření brousícího nástroje.

Brousící nástroje s keramickým pojivem jsou křehké, citlivé vůči nárazu a bočnímu tlaku. Mají univerzální použití a při dobrém skladování se jejich vlastnosti nemění.

Pevnost magnezitového pojiva se skladováním snižuje a škodí mu zejména vlhko a kyselé a zásadité prostředí. Kotouče s tímto pojivem jsou křehké a používají se pro jemný výbrus bez tepelného ovlivnění součásti.

Nástroje s pojivem z umělé pryskyřice jsou méně citlivé vůči nárazům a boční tlakům, zvláště kotouče se sklo - textilní výztuží. Používají se pro hrubování, broušení vnitřních i vnějších válcových ploch, rovinných ploch, řezání kovů, kamene a keramiky.

Kotouče s pryžovým pojivem se používají na jemné ostření nástrojů, broušení vnějších válcových ploch, jako tenké řezací kotouče a pro zvlášť elastické nástroje na čištění a leštění.

Nástroje s polyuretanovým pojivem se používají pro jemné broušení a leštění.

Kotouče s šelakovým pojivem jako lešticí pro leštění kamene.

Druh pojiva se označuje:

- keramické - V,
- umělá pryskyřice - B,
- magnezitové - Mg,
- pryžové - R.

1.7.2 DIAMANTOVÉ BROUSÍCÍ MATERIÁLY

Diamantové brousící materiály jsou obvykle nanášeny na činnou pracovní část brousícího nástroje jako diamantový prášek ve formě zrn propojených pojivem. Pro diamantové nástroje se používají pojiva kovová a pryskyřičná. K základním charakteristikám diamantových brousících materiálů patří základní surovina diamantových zrn, druh diamantového prášku, zrnitost a koncentrace diamantů v nástroji. Základní surovinou je nejčastěji syntetický diamant - DS, nebo v omezeném množství diamant přírodní - D. Zrnitost diamantového prášku se vyjadřuje mezními rozměry zrn brusiva v μm .

Diamantové brousicí nástroje se používají pro broušení tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů. Používají se pro jemné dokončovací broušení a ostření řezných nástrojů se slinutými karbidy, pro dokončovací broušení a lapování.

1.7.3 BROUSICÍ MATERIÁLY Z KUBICKÉHO NITRIDU BORU

Prášek kubického nitridu boru ve formě jednotlivých zrn je nanesen na činnou pracovní část brousicího nástroje a je spojený vhodným pojivem. K základním charakteristikám patří zrnitost, koncentrace, druh pojiva a tvrdost brousicího materiálu. Pojiva se používají organická, kovová, nebo keramická. Brousicí nástroje z kubického nitridu boru se používají pro ostření řezných nástrojů, pro broušení tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, pro tvarové broušení apod.

2 PRODUKTIVITA A HOSPODÁRNOST OBRÁBĚNÍ [2], [5], [1]

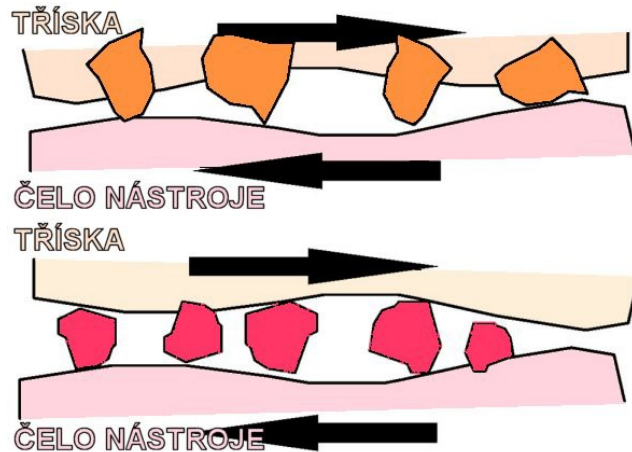
2.1 OPOTŘEBENÍ BŘITU NÁSTROJE

Opotřebení je běžným důsledkem funkce všech strojních součástí, které jsou ve vzájemném kontaktu a relativním pohybu. Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu nástroj - obrobek a nástroj - tříška, i ke kontaktu nástroje s obrobkem (na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje) a odcházející třískou (na čele nástroje), což musí nutně vést k opotřebení nástroje. Protože podmínky práce řezného nástroje se zásadně liší od podmínek práce běžných strojních součástí, je třeba i k procesu opotřebení nástroje přistupovat jiným způsobem.

Proces obrábění je doprovázen velkým mechanickým zatížením nástroje a vyvíjí se při něm velké množství tepla, které působí zejména na ploše čela a hřbetu řezného břitu. Materiál břitu nástroje je značně namáhán tímto mechanickým a tepelným zatížením a dochází k jeho opotřebení. Většina obráběných materiálů obsahuje tvrdé částice různého druhu, které svoji tvrdostí u nástroje vyvolávají brousící efekt.

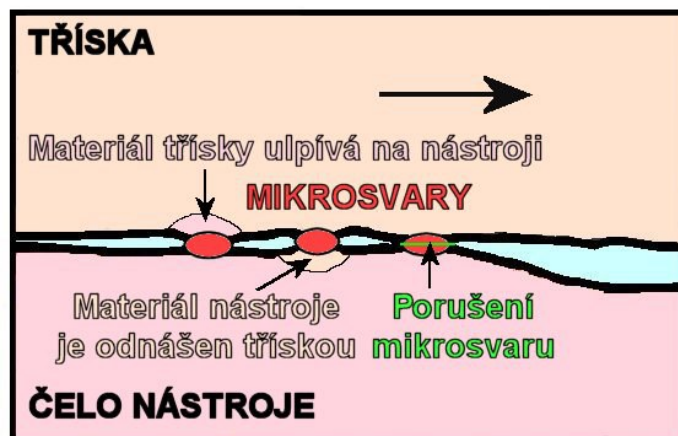
Proces opotřebení nástroje je velmi složitý děj, který závisí na mnoha faktorech (fyzikální a zejména mechanické vlastnosti obráběného a nástrojového materiálu, druh obráběcí operace, geometrie nástroje, pracovní podmínky, řezné prostředí, atd.) a v jehož průběhu působí mnoho odlišných fyzikálně - chemických jevů (mechanizmů opotřebení). K základním mechanizmům opotřebení břitu nástroje patří zejména:

- **abraze** (brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic uvolněných z obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje) - obr. 2.1. Nejvíce tento druh opotřebení vzniká při obrábění legovaných ocelí a litin, které obsahují karbidotvorné legury, jako jsou chrom, wolfram, molybden a vanad. Tvrdost karbidů těchto prvků mnohdy dosahuje tvrdosti slinutých karbidů. Jedná se velmi rozšířený mechanismus opotřebení, kdy se tvrdé částice uvolněné z obráběného materiálu, nebo nástroje, dostávají mezi povrch obrobku a povrch nástroje a působí brusným účinkem na povrch břitu. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení je závislá na tvrdosti břitu nástroje. Abrazivní opotřebení nejvíce vzniká při nižších řezných rychlostech a větším mechanickém zatížení, kdy se plochy nástroje a obrobku dotýkají na vrcholcích mikronerovností. Brusný otěr je tedy nejvýznamnější při obrábění nástroji z nástrojových a rychlořezných ocelí,



Obr. 2.1 Schéma abrazního opotřebení nástroje [2]

- **adheze** (vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích mikronerovností čela a třísky v důsledku vysokých tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů) - obr. 2.2. Adhezní opotřebení je způsobené vytrháváním částic z obráběného materiálu, které zůstávají nalepeny na čele a hřbetu nástroje a částic břitu v důsledku adhezních spojů mezi nástrojem a obrobkem. Protože tvrdost nástrojového materiálu je podstatně vyšší, objem odtržených částic z materiálu obrobku značně převyšuje objem odtržených částic z nástroje. Nejvýznamnější je při nižších řezných rychlostech a vzniku bodového styku, který umožňuje adhezní spojení obou materiálů,

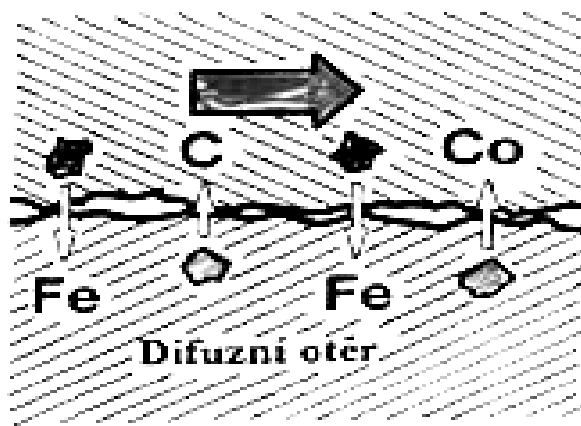


Obr. 2.2 Schéma adhezního opotřebení nástroje [2]

- **difuze** (migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje). Difuzní ořez vzniká působením chemických vlivů při procesu obrábění. Hlavními faktory pro vznik a působení difuzního opotřebení jsou chemické vlastnosti nástrojového i obráběného materi-

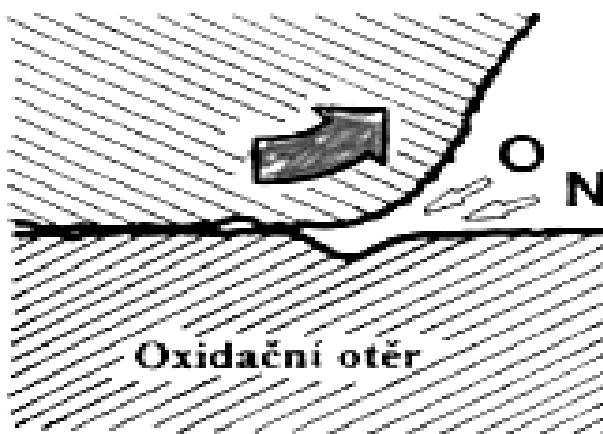
álu, afinita nástroje vůči materiálu obrobku a vysoká řezná teplota. Některé řezné materiály s materiálem obrobku nereagují vůbec, zatímco jiné mají ve vztahu k obrobku vysoký stupeň afinity.

Například vysoká afinita mezi slinitým karbidem a ocelí vede při obrábění k vytvoření žlábků na čele břitů vyměnitelné břitové destičky. K největšímu difuznímu opotřebení dochází při vysokých řezných rychlostech, kdy se vyvíjí velké množství tepla a vzniká největší žlábek. Při řezných teplotách okolo $800 \div 900 \text{ } ^\circ\text{C}$ je difuze převládajícím mechanismem opotřebení čela i hřbetu břitů nástroje,



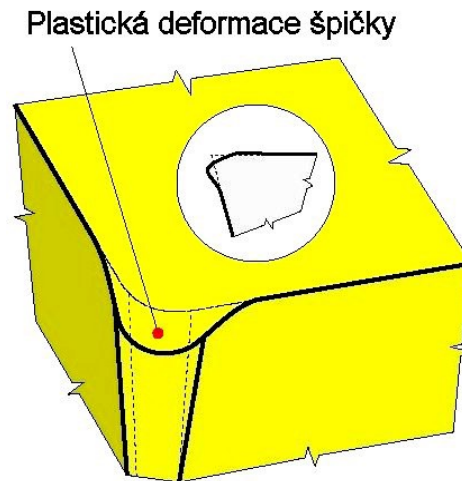
Obr. 2.3 Schéma difuzního opotřebení [1]

- **oxidace** (vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí). Oxidační opotřebení souvisí s vysokými teplotami řezného procesu a vzniklé oxidy působí velmi rozdílně. Porézní oxidy wolframu a kobaltu jsou snadno odnášeny třískou. Jiné oxidy, jako například oxid hlinitý, je proti nim podstatně tvrdší, pevnější a hůře odstranitelný z místa řezu,



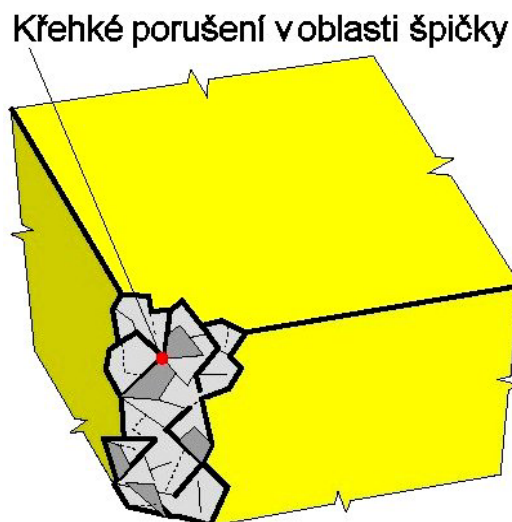
Obr. 2.4 Schéma oxidačního opotřebení [1]

- **plastická deformace** (důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení kumulovaného v čase), která se může ve svém nejnepríznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení. Vysoké teploty a tlaky při obrábění vznikají používáním vysokých řezných rychlostí a rychlostí posuvů a tvrdými materiály obrobků. Plastická deformace břitů se vyskytuje při obrábění u všech druhů řezných materiálů po dosažení určité limitní teploty v některém místě mezi stykovými plochami nástroje a obrobku,



Obr. 2.5 Schéma plastické deformace břitové destičky [2]

- **křehký lom** (důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu, atd.). Lom břitu představuje náhlou poruchu s okamžitým koncem technického života nástroje a mělo by se mu za všech okolností předcházet. Křehký lom může být způsobený mnoha faktory, ale mezi hlavní příčinu tohoto opotřebení patří zejména to, že zvolený materiál není dostatečně houževnatý, aby mohl zvládnout všechny požadavky na obrábění daného materiálu.



Obr. 2.6 Schéma křehkého lomu [2]

Mimo výše uvedených základních mechanismů uvádí odborná literatura i tyto další mechanizmy opotřebení:

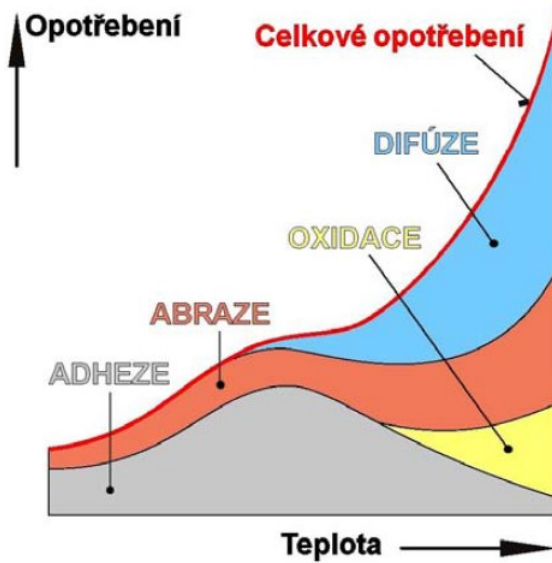
- mechanická únava,
- tepelná únava (projevuje se většinou vytvářením hřebenovitých trhlin kolmých na ostří, a to na čele i hřbetě nástroje),
- delaminační opotřebení (odlupování tenkých vrstev z povrchu nástroje - častý jev zejména u povlakovaných SK),
- termoelektrické opotřebení (odstraňování elektricky vodivého materiálu z funkčních povrchů nástroje),
- rozpouštění nástrojového materiálu (v jednotlivých bodech na povrchu nástroje),
- elektrochemické opotřebení (výměna iontů mezi materiálem nástroje a obrobku).

Schopnost bříty odolávat abrazivnímu otěru je z větší části závislá na jeho tvrdosti. Řezný materiál, který obsahuje hustou strukturu tvrdých částic, bude abrazivnímu otěru odolávat dobře, avšak nemusí stejně dobře odolávat také jiným mechanismům opotřebení.

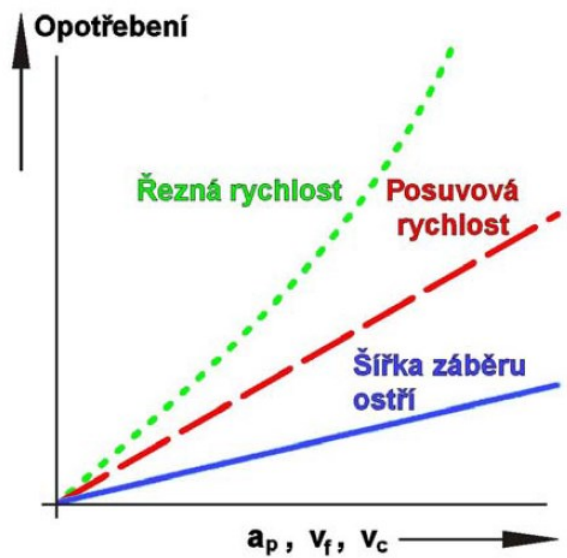
Adhezní otěr se vyskytuje hlavně při nízkých teplotách obrábění na čele bříty nástroje. Je významný při nižších řezných rychlostech, kdy vzniká bodový styk mezi třískou a nástrojem a kdy je umožněno adhezní spojení obou materiálů.

Teplota řezání, chemické vlastnosti nástrojového materiálu a jeho afinita vůči materiálu obrobku jsou rozhodujícími činiteli pro vznik a průběh difuzního opotřebení. Na tomto procesu má tvrdost materiálu jen relativně malý podíl. O podílu difuzního opotřebení na celkovém opotřebení rozhoduje chemické složení řezného nástrojového materiálu a materiálu obrobku.

Plynule působící základní mechanizmy opotřebení mají různý podíl na celkovém opotřebení a tento podíl se mění s narůstající teplotou (obr. 2.7). Z řezných podmínek má na intenzitu celkového opotřebení největší vliv řezná rychlost v_c , menší vliv vykazuje posuvová rychlost v_f a nejmenší hloubka záběru ostří a_p (obr. 2.8).



Obr. 2.7 Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení nástroje [2]

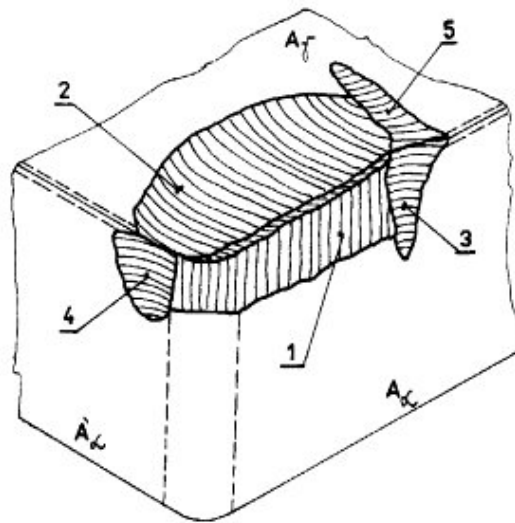


Obr. 2.8 Vliv řezných podmínek na opotřebení nástroje [2]

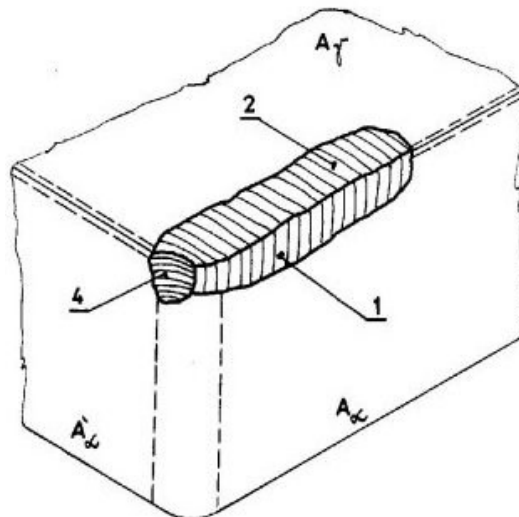
2.1.1 FORMY OPOTŘEBENÍ

Vzhled břitu nástroje ze slinutého karbidu se všemi typickými formami opotřebení, je uveden na obrázku číslo 2.9, vzhled břitu nástroje z řezné keramiky na obrázku číslo 2.10. Jednotlivé formy opotřebení jsou na obou obrázcích označeny následovně:

- 1) - fazetka opotřebení na hřbetě,
- 2) - výmol na čele,
- 3) - primární hřbetní rýha,
- 4) - sekundární (oxidační) hřbetní rýha,
- 5) - rýha na čele.



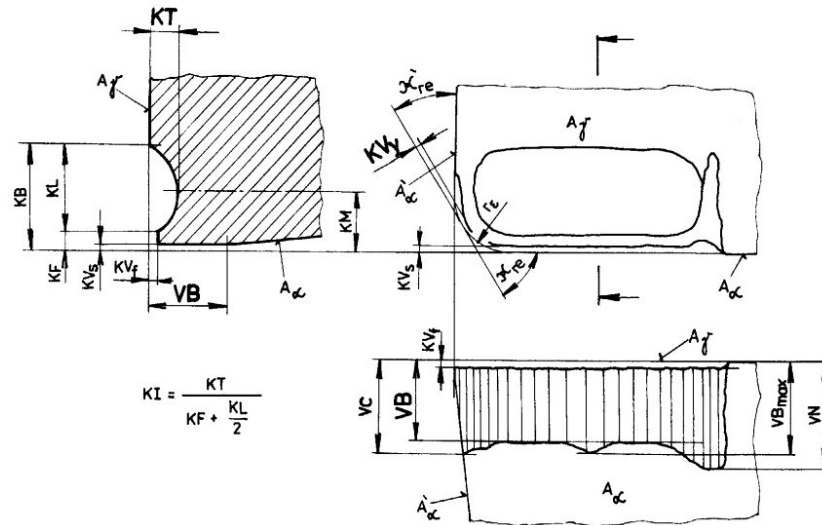
Obr. 2.9 Formy opotřebení nástroje ze slinutých karbidů [2]



Obr. 2.10 Formy opotřebení nástroje z řezné keramiky [2]

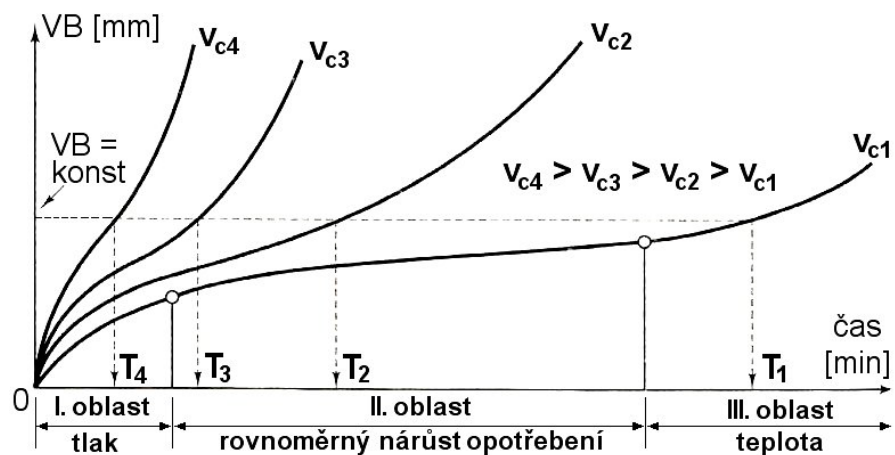
2.1.2 KRITÉRIA OPOTŘEBENÍ

Kritéria, kterými je opotřebení kvantifikováno, jsou uvedena na obrázku číslo 2.11 (nejčastěji užívaná kritéria, VB - šířka fazetky opotřebení na hřbetě, KT - hloubka výmolu na čele, KV_y - radiální opotřebení špičky, jsou zvýrazněna většími písmeny). Kritérium KV_y je významné zejména u dokončovacích operací, protože způsobuje změnu rozměru obrobené plochy. Označování jednotlivých kritérií odpovídá místním zvyklostem, které se poněkud liší od normy ČSN ISO 3685, která označuje kritéria opotřebení na hřbetě VB_C (VC na obrázku č. 2.11), VB_B (VB), $VB_{B\max}$ (VB_{\max}) a VB_N (VN).



Obr. 2.11 Kritéria opotřebení řezného nástroje [2]

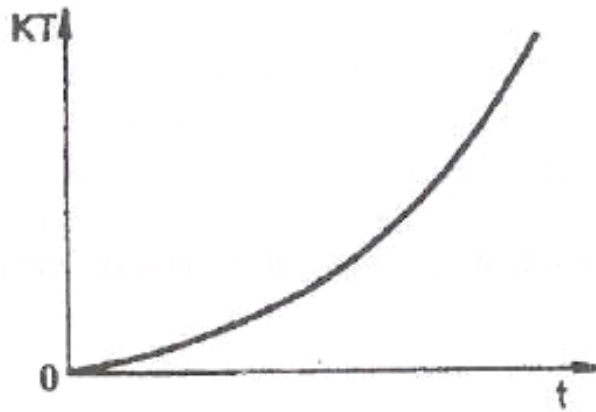
Doporučené hodnoty kritéria VB leží v rozsahu $0,2 \div 0,8$ mm, jeho charakteristický časový průběh je uveden na obrázku číslo 2.12 (křivka pro nejmenší řeznou rychlost v_{c1}). Poměrně rychlý nárůst hodnoty VB v oblasti I je způsoben velkým měrným tlakem, který působí na styku hlavního hřbetu nástroje s přechodovou plochou obrobku v důsledku velmi malé stykové plochy. V oblasti II hodnota VB rovnoměrně narůstá v důsledku působení základních mechanismů opotřebení, nakumulované tepelné zatížení nástroje znamená výrazné zvýšení intenzity opotřebení v oblasti III.



Obr. 2.12 Časová závislost opotřebení VB pro různé řezné rychlosti [2]

Časový průběh hloubky výmolu na čele (KT) má charakter exponenciální křivky, doporučené hodnoty leží v rozsahu $0,2 \div 0,3$ mm, limitní hodnota se např. pro soustružení počítá v praxi podle vztahu:

$$KT = 0,06 + 0,3f \text{ [mm]}, \quad (2.1)$$



Obr. 2.13 Charakteristický průběh závislosti $KT = f(t)$ [1]

kde: f [mm] - hodnota posuvu na otáčku.

Dalším praktickým kritériem opotřebení, které při hospodárných řezných podmínkách může rozhodovat o trvanlivosti břitu mnohem častěji než např. kritérium VB, je prolomení výmolu na čele do vedlejšího ostří v oblasti sekundární hřbetní rýhy. Toto kritérium bude rozhodující zejména z hlediska posuzování struktury obrobeného povrchu, protože znamená výrazné zhoršení parametrů drsnosti.

2.2 TRVANLIVOST A ŽIVOTNOST NÁSTROJE

Poruchy nástroje lze rozlišovat z mnoha hledisek. Z technologického hlediska se rozlišuje porucha postupná (postupná změna jednoho, nebo více parametrů - např. opotřebení břitu nástroje), nebo porucha náhlá (prudká změna jednoho, nebo více parametrů - např. vylomení břitu a celková destrukce nástroje). Postupná porucha může být v závislosti na čase předvídatelná, ale u náhlé poruchy je její vznik nepředvídatelný.

Jako kritérium vzniku poruchy a ukončení provozuschopného stavu nástroje se mohou diagnostikovat tyto parametry opotřebení břitu:

- drsnost povrchu obrobené plochy,
- úchylka rozměru obrobené plochy,
- velikost řezné síly apod.

Řezný nástroj se z pohledu teorie spolehlivosti posuzuje buď jako neobnovovaný objekt, kdy se po vzniku poruchy neobnovuje jeho provozuschopný stav (například výměni-

telná destička s jedním břitem), nebo jako obnovovaný objekt, kdy se po vzniku poruchy provozuschopný stav obnovuje (například přestřžení šroubovitého vrtáku).

Trvanlivost řezného nástroje lze definovat jako součet všech čistých časů řezání, od začátku obrábění, až po opotřebení břitu nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (kritérium opotřebení a jeho hodnota musí být stanoveny tak, aby vyráběný obrobek měl požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu a to po celou dobu trvanlivosti nástroje). U neobnovovaných nástrojů je trvanlivost nástroje stejná s jeho životností a shoduje se s dobou vzniku poruchy. U obnovovaných nástrojů se trvanlivost shoduje s dobou mezi jednotlivými poruchami a životnost s celkovou dobou provozního života nástroje, která je dána součtem jednotlivých trvanlivostí za celou dobu používání nástroje.

V technické praxi se trvanlivost a životnost břitu nástroje nejčastěji vyjadřuje jako čas řezného procesu [min], nebo jako dráha řezu [m, km]. Pro technologie vrtání, vyhrubování a vystružování děr se trvanlivost nástroje často vyjadřuje jako délka obrobené díry [m, km].

Životnost nástroje je pak definována jako součet všech jeho trvanlivostí, nebo též jako celková doba funkce nástroje od prvního uvedení do činnosti až do jeho vyřazení (nástroje, které lze ostřit jsou vyřazeny v případě, že byla odbroušena celá jejich funkční část, vyměnitelné břitové destičky v případě, že byly použity všechny jejich břity). Z tohoto hlediska lze tedy životnost přebroušovaného nástroje vyjádřit vztahem:

$$Z = \sum_{i=1}^{x+1} T_i = (x+1) \cdot T \text{ [min]} \quad (2.2)$$

kde: T_i [min] - jednotlivé trvanlivosti,

T [min] - aritmetický průměr hodnot T_i ,

x [-] - počet možných ostření nástroje.

Pro nástroj s mechanicky upínanými vyměnitelnými břitovými destičkami se životnost stanoví podle vztahu:

$$Z = \sum_{i=1}^q T_i = q \cdot T \text{ [min]} \quad (2.3)$$

kde: T_i [min] - trvanlivosti jednotlivých ostří destičky,

T [min] - aritmetický průměr hodnot T_i ,

q [-] - počet použitelných ostří destičky.

Trvanlivost nástroje, podobně jako opotřebení nástroje, závisí zejména na metodě obrábění (soustružení, frézování, vrtání, atd.), vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách (řezná a posuvová rychlost, hloubka záběru ostří, řezné prostředí). Již počátkem 20. století zjistil Frederick Winslow Taylor, že z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv právě řezná rychlost a odvodil základní vztah pro vzájemnou závislost těchto dvou veličin, na němž jsou založeny dnešní normy ČSN ISO 3685, i ČSN ISO 8688 - 1 a ČSN ISO 8688 - 2 a který je u nás známý pod názvem "T - v_c závislost" (někdy též "Taylorův vztah") a užívá se ve tvaru:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} [\text{min}], \quad (2.4)$$

kde: C_T [-] - konstanta,

v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] - řezná rychlost,

m [-] - exponent,

nebo vzhledem k velmi vysoké a nepraktické hodnotě konstanty C_T (řádově $10^9 \div 10^{13}$), která závisí především na materiálu obrobku častěji ve tvaru:

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} [m \cdot \text{min}^{-1}], \quad (2.5)$$

kde: C_v [-] - konstanta (protože $C_v = C_T^{1/m}$, je řádová velikost konstanty C_v pouze $10^2 \div 10^3$).

Velikost exponentu m charakterizuje vlastnosti řezného nástroje a bývá pro:

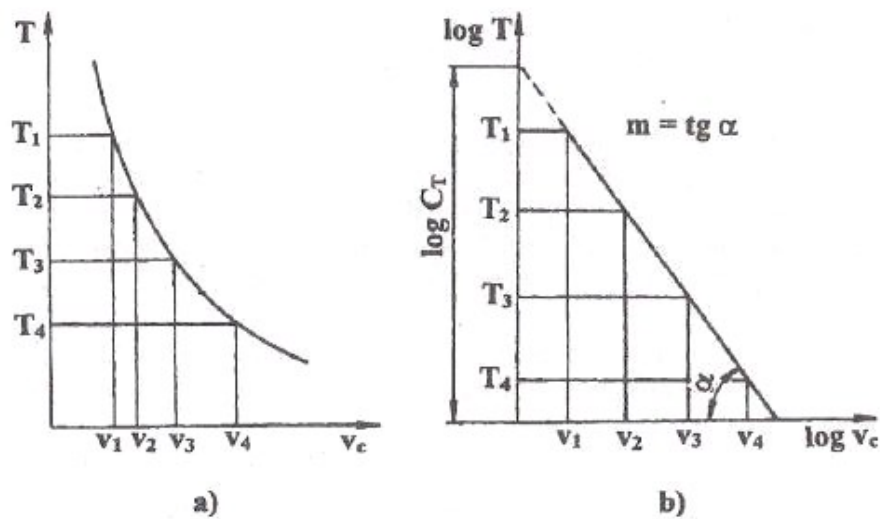
- nástrojové oceli - $m = 10 \div 8$ (až 6),
- rychlořezné oceli - $m = 8 \div 5$ (až 3),
- slinuté karbidy - $m = 5 \div 2,5$ (až 2),
- řezná keramika - $m = 2,5 \div 1,5$ (až 1,2).

Postup při stanovování základní T - v_c závislosti pro konkrétní kombinaci řezný nástroj - obráběný materiál, vychází z definice trvanlivosti. Za ostatních konstantních řezných podmínek (např. pro soustružení: hloubka záběru ostří $a_p = \text{konst}$, posuv na otáčku $f = \text{konst}$, způsob chlazení) je daný materiál obráběn daným nástrojem minimálně při čtyřech

různých řezných rychlostech, přičemž se sleduje časový nárůst opotřebení nástroje (např. VB), který se vynáší do závislosti $VB = f(\text{čas})$. Aby bylo dosaženo rovnoměrné rozložení jednotlivých bodů pro konstrukci T-vc závislosti, volí se řezné rychlosti podle řady R20 (1,00 - 1,12 - 1,25 - 1,40 - 1,60 - 1,80 - 2,00 - 2,24 - 2,50 - 2,80 - 3,15 - 3,55 - 4,00 - 4,50 - 5,00 - 5,60 - 6,30 - 7,10 - 8,00 - 9,00 - 10,00; tuto řadu předepisuje norma ČSN ISO 3685 pro nástroj ze slinutého karbidu), pokud je zapotřebí vyšší rozsah změny řezné rychlosti, podle řady R10 (1,00 - 1,25 - 1,60 - 2,00 - 2,50 - 3,15 - 4,00 - 5,00 - 6,30 - 8,00 - 10,00; tuto řadu předepisuje norma ISO 3685 pro keramický řezný nástroj). U nástroje z rychlořezné oceli předepisuje norma ISO 3685 pro volbu řezných rychlostí řadu R40. Při nejvyšší řezné rychlosti nemá trvanlivost klesnout pod hodnotu $T = 5$ minut (pro obrábění drahých materiálů se přípouští nižší trvanlivost, ne však pod hodnotou $T = 2$ minuty).

Pro předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (např. $VB = \text{konst} = 0,3 \text{ mm}$) jsou z časových křivek VB odečteny hodnoty trvanlivosti T_1, T_2, T_3 a T_4 , které odpovídají zvoleným řezným rychlostem v_{c1}, v_{c2}, v_{c3} a v_{c4} . Body o souřadnicích $v_{c1} - T_1, v_{c2} - T_2, v_{c3} - T_3$ a $v_{c4} - T_4$ jsou pak vyneseny do diagramu s logaritmickými souřadnicemi T a v_c , kde vytvoří přímku, která odpovídá zvolené hodnotě VB. Matematicky je získaná T - v_c závislost popsána základními vztahy (2.4) a (2.5), hodnotu konstanty C_T lze odečíst na ose T pro řeznou rychlost $v_c = 1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, hodnotu konstanty C_v na ose v_c pro trvanlivost $T = 1 \text{ min}$, exponent m vyjadřuje směrnici vytvořené přímky, $m = \text{tg } \alpha$. Nevýhodou uvedených základních vztahů T - v_c závislosti je omezení následujícími podmínkami:

- hloubka záběru ostří $a_p = \text{konst}$,
- posuv na otáčku $f = \text{konst}$,
- opotřebení $VB = \text{konst}$.



Obr.2.14 Průběh závislosti $T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m}$ [1]
 a - lineární souřadnice
 b - logaritmické souřadnice

V praxi jsou proto často používány rozšířené vztahy pro T - v_c závislost ve tvaru (např. pro soustružení):

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} [m \cdot \text{min}^{-1}], \quad (2.6)$$

kde: v_{cT} [$m \cdot \text{min}^{-1}$] - řezná rychlost při konstantní trvanlivosti T , např. v_{c15} znamená řeznou rychlost při trvanlivosti $T = 15$ minut,

kde: C_{vT} [-] je konstanta,

x_v [-] je exponent, vyjadřující vliv hloubky řezu,

y_v [-] je exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku,

nebo ve tvaru:

$$v_c = \frac{C_{v1}}{T^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.7)$$

kde: C_{v1} [-] - konstanta (pozn.: konstanty C_{v1} , C_{vT} a C_v mají rozdílné číselné hodnoty dokonce i pro stejnou kombinaci nástroj - obrobek!).

2.3 OPERAČNÍ VÝROBNÍ NÁKLADY

Operační výrobní náklady na obrobení jednoho kusu konkrétní součásti (vztažené k obráběcímu stroji a řeznému nástroji) se za předpokladu, kdy se obrábí jedna plocha jedním nástrojem, vyjádří pomocí celkových operačních výrobních nákladů N_c jako součet dílčích složek:

$$N_c = N_s + N_v + N_n \text{ [Kč]}, \quad (2.8)$$

kde: N_s [Kč] - náklady na strojní práci,

N_v [Kč] - náklady na vedlejší práci,

N_n [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jeden kus.

Náklady na strojní práci souvisí s jednotkovým strojním časem, potřebným pro obrobení jednoho kusu obrobku:

$$N_s = t_{AS} \cdot N_{sm} \text{ [Kč]}, \quad (2.9)$$

kde: t_{AS} [min] - jednotkový strojní čas,

N_{sm} [Kč] - náklady na minutu strojní práce.

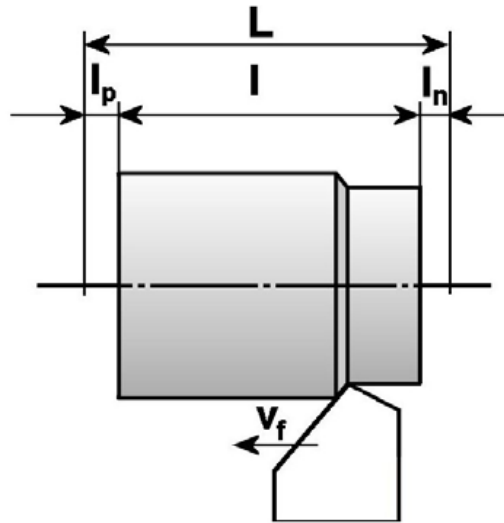
Jednotkový strojní čas t_{AS} je čas automatického chodu obráběcího stroje. Při obrobení dané součásti je pro většinu obráběcích metod definován obecným vztahem:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \text{ [min]}, \quad (2.10)$$

kde: L [mm] - dráha nástroje ve směru posuvu,

v_f [mm.min⁻¹] - posuvová rychlost.

Při stanovení dráhy nástroje ve směru posuvu se vychází z konkrétních technologických poměrů, např. podle obr. 2.15 pro podélné soustružení válcové plochy:



Obr. 2.15 Dráha nástroje ve směru posuvu při soustružení válcové plochy [2]

$$L = l_n + l + l_p \text{ [mm]}, \quad (2.11)$$

kde: l_n [mm] - délka náběhu,

l [mm] - délka soustružené plochy,

l_p [mm] - délka přeběhu.

Náklady na vedlejší práci N_v korespondují s upínáním a odepínáním obrobku, měřením součásti apod. a vyjádří se vztahem:

$$N_v = t_{AV} \cdot N_{vm} \text{ [Kč]}, \quad (2.12)$$

kde: t_{AV} [min] - jednotkový vedlejší čas,

N_{vm} [Kč] - náklady na minutu vedlejší práce (pro praktické řešení platí $N_{vm} \cong N_{sm}$).

Náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jeden kus obrobku N_n se vyjádří pomocí vztahu:

$$N_n = B \cdot z_v \text{ [Kč]}, \quad (2.13)$$

kde: B [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost,

z_v - počet výměn nástroje vztažený na obrobení jednoho kusu a je dán vztahem:

$$z_v = \frac{t_{AS}}{T} \cdot \lambda [-], \quad (2.14)$$

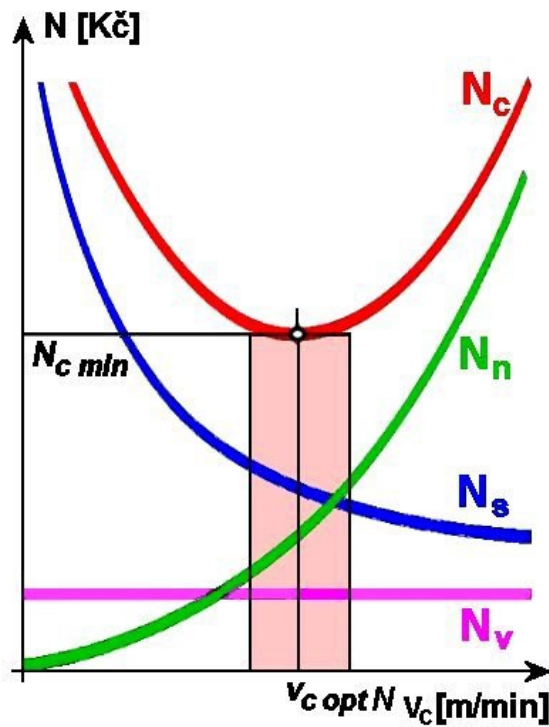
Jednotkový strojní čas je obecně větší než čas řezného procesu ke kterému se trvanlivost vztahuje, proto se v posledním vztahu zavádí součinitel λ :

$$\lambda = \frac{l}{L}, \quad (2.15)$$

kde: L [mm] - celková délka, kdy je zapnutý strojní posuv,

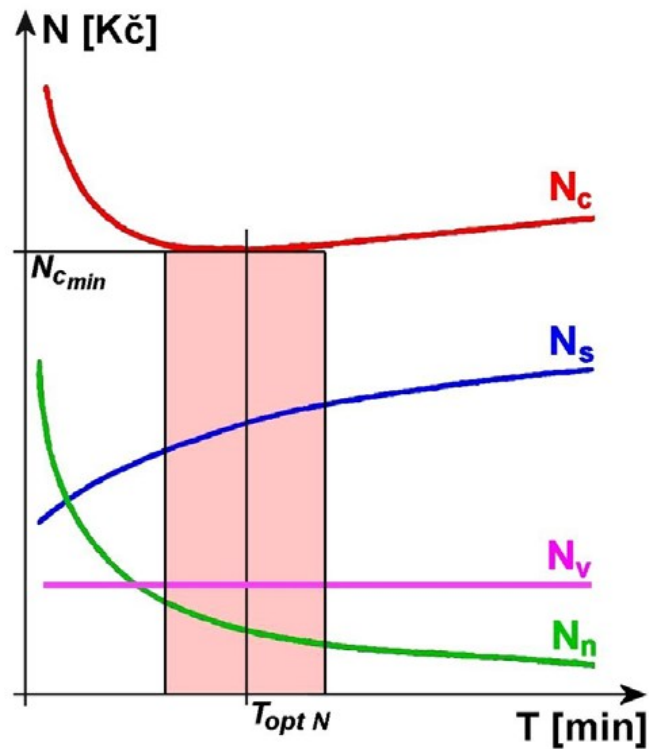
l [mm] - délka obráběné plochy.

Závislost celkových operačních výrobních nákladů a jejich jednotlivých složek na řezné rychlosti je uvedena na obrázku č. 2.16, kde je také vyznačena oblast optimální řezné rychlosti.



Obr. 2.16 Závislost nákladů na řezné rychlosti [2]

Grafické znázornění obecného průběhu celkových operačních nákladů a jejich jednotlivých složek v závislosti na trvanlivosti je na obr. 2.17 s vyznačením pásma T_{optN} . V současné technické praxi dosahuje optimální trvanlivost hodnoty 15 minut.



Obr. 2.17 Závislost nákladů na trvanlivosti [2]

2.4 OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOST BŘITU NÁSTROJE

Trvanlivost břitu nástroje obecně závisí na materiálu obrobku, materiálu nástroje, řezných podmínkách a řezném prostředí. Hodnotu optimální trvanlivosti lze stanovit buď z hlediska maximální výrobnosti za jednotku času (tedy maximální možný úběr materiálu), nebo z hlediska minimálních nákladů pro obrobek dané součásti (souvisí s hospodárností výroby). Obecný postup je dále konkretizován pro podélné soustružení válcové plochy o charakteristických rozměrech D , l , L , kdy se obrábí jedna plocha jedním nástrojem.

2.4.1 KRITÉRIUM MINIMÁLNÍCH VÝROBNÍCH NÁKLADŮ

Pro kritérium minimálních výrobních nákladů se při výpočtu vychází ze vztahu (2.8):

$$N_c = N_s + N_v + N_n \text{ [Kč]},$$

s použitím vztahů 2.9, 2.10, 2.12, 2.13, 2.14 dostaneme:

$$N_c = \frac{L}{v_f} \cdot N_{sm} + t_{AV} \cdot N_{vm} + B \cdot \frac{L}{v_f \cdot T} \cdot \lambda. \quad (2.16)$$

Hodnotu posuvové rychlosti lze vypočítat podle vztahu:

$$v_f = n \cdot f, \quad (2.17)$$

kde: n [min^{-1}] - otáčky obrobku,
 f [mm] - posuv na otáčku.

Protože řezná rychlost se při podélném soustružení vypočítá podle vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3}, \quad (2.18)$$

platí:

$$n = \frac{10^3 \cdot v_c}{\pi \cdot D}, \quad (2.19)$$

kde: D [mm] - průměr obrobku.

Po dosazení a úpravě podle vzorce (2.5) $v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} [m \cdot \text{min}^{-1}]$ do vztahu (2.19) platí:

$$n = \frac{10^3 \cdot C_v}{\pi \cdot D \cdot T^{1/m}}. \quad (2.20)$$

Dosazením do vztahu (2.16) a po úpravě lze získat vztah:

$$N_C = \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot T^{1/m}}{10^3 \cdot f \cdot C_v} \cdot N_{sm} + t_{AV} \cdot N_{vm} + B \cdot \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot T^{(1/m-1)} \cdot \lambda}{10^3 \cdot f \cdot C_v}, \quad (2.21)$$

Náklady na minutu strojní práce N_{sm} se stanoví podle vztahu:

$$N_{sm} = \frac{E}{60}, \quad (2.22)$$

kde: E [Kč.h⁻¹] - náklady na hodinu strojní práce.

Po dosazení (2.22) do (2.21) a úpravě dostaneme:

$$N_C = k_1 \cdot T^{1/m} \cdot \frac{E}{60} + t_{AV} \cdot N_{vm} + B \cdot k_1 \cdot \lambda \cdot T^{(1/m-1)}, \quad (2.23)$$

$$\text{Kde: } k_1 = \frac{L \cdot \pi \cdot D}{10^3 \cdot f \cdot C_v}, \quad (2.24)$$

Po derivaci vztahu (2.23) podle trvanlivosti T , za předpokladu, že hodnoty t_{AV} a N_{vm} jsou ve vztahu k trvanlivosti konstantní (jejich derivací tedy bude nula) a předpokladu, že tato derivace je rovna nule získáme vztah:

$$\frac{dN_c}{dT} = k_1 \cdot \frac{1}{m} T^{(1/m-1)} + B \cdot k_1 \cdot \frac{1}{m-1} \cdot \lambda \cdot T^{(1/m-2)} = 0, \quad (2.25)$$

Odtud je optimální trvanlivost pro kritérium minimálních operačních výrobních nákladů ve tvaru:

$$T_{optN} = \frac{60 \cdot B}{E} \cdot \lambda \cdot (m-1) \text{ [min]}, \quad (2.26)$$

kde: B [Kč.břít⁻¹] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost,

E [Kč.h⁻¹] - náklady na hodinu strojní práce,

m [-] - exponent závislosti $T - v_c$.

Ze vztahu (2.26) vyplývá, že čím dražší a nákladnější je obráběcí stroj, tím budou hodnoty E vyšší a tím pádem T_{optN} bude nabývat nižších hodnot a řezná rychlost se pak bude zvyšovat. Pro obráběcí proces realizovaný stejným nástrojem na stejné obráběné součásti, avšak na různých obráběcích strojích, mohou být z hlediska optimalizace trvanlivosti navrhovány různé řezné podmínky.

2.4.2 KRITÉRIUM MAXIMÁLNÍ VÝROBNOSTI

Hodnotu optimální trvanlivosti lze určit také z hlediska maximálního úběru materiálu za jednotku času bez ohledu na hospodárnost, tj. při dosažení maximální výrobnosti stroje za časovou jednotku. Maximální výrobnost koresponduje s minimální hodnotou operačního času jednotkové práce, který se v daném případě vyjádří jako součet jednotlivých složek:

$$t_c = t_{AS} + t_{AV} + \frac{t_{AX}}{Q}, \quad (2.27)$$

Kde: t_c [min] - celkový čas na obrobění jednoho kusu,

t_{AS} [min] - čas automatický strojní,

t_{AX} [min] - čas na výměnu nástroje a seřízení stroje,

t_{AV} [min]- je součet vedlejších časů,

Q [-] - počet kusů obrobeneých za jednu trvanlivost nástroje.

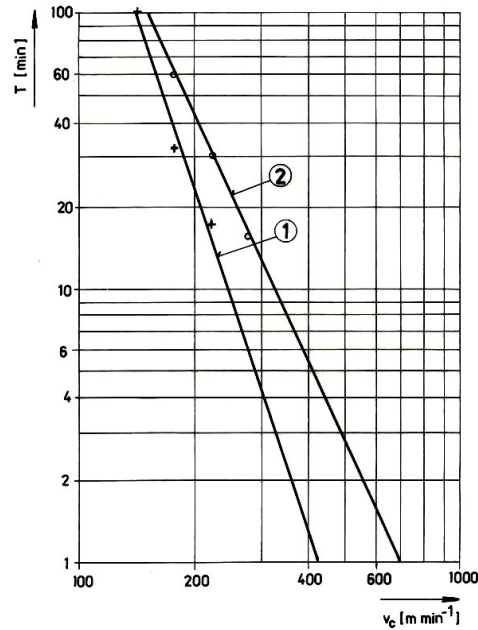
Po obdobné úpravě a postupu je optimální trvanlivost pro maximální výrobnost:

$$T_{optV} = (m - 1) \cdot t_{Ax} \cdot \lambda \quad (2.28)$$

2.5 ŘEZIVOST NÁSTROJE

Řezivost nástroje lze charakterizovat např. jako vlastnost, která umožňuje nástroji efektivním způsobem odebírat třísku z obráběného materiálu. Tato vlastnost úzce souvisí s fyzikálními a mechanickými vlastnostmi nástroje, je také ale ovlivněna i dalšími faktory, jako je metoda obrábění, geometrie nástroje, řezné podmínky, řezné prostředí, atd. Není vlastností absolutní, a to zejména v tom smyslu, že závisí i na obráběném materiálu, především na jeho mechanických vlastnostech (např. za jinak stejných podmínek vykáže nástroj ze slinutého karbidu P20 velmi dobrou řezivost při soustružení běžné oceli, ale bude mít velmi nízkou nebo dokonce nulovou řezivost při soustružení kalené oceli).

Obrázek č. 2.18 dokumentuje situaci, kdy jeden z nástrojových materiálů (povlakovaný SK, označeno 2) má vyšší řezivost v celém uváděném rozsahu řezných rychlostí (pro libovolnou řeznou rychlost v tomto rozsahu je jeho trvanlivost vždy vyšší, než trvanlivost nepovlakovaného SK, označeno 1).



ČELNÍ FRÉZOVÁNÍ BEZ CHLAZENÍ
 ocel 12 050.1
 nástroj ISCAR F45 ST - D 63 - 22
 destičky SEHW 1204 AFTN
 ○ ① ISCAR IC 50 M (P25)
 + ② ISCAR IC 250 (povlak.)
 $a_p = 2,5 \text{ mm}$, $B = 36 - 38 \text{ mm}$, $f_z = 0,22 \text{ mm}$
 $VB = 0,4 \text{ mm}$

Obr.2.18 T- v_c závislosti, frézování [2]

2.6 OBROBITELNOST MATERIÁLU

Z hlediska technologie obrábění je obrobiteľnosť jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu a v obecném smyslu ji lze definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Je hlavním činitelem, který ovlivňuje volbu řezných podmínek pro funkci nástroje při všech metodách obrábění.

Obrobiteľnosť závisí na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou:

- způsob výroby a tepelného zpracování obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- metoda obrábění,
- řezné podmínky,
- řezné prostředí,

- geometrie nástroje,
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu.

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem je obrobiteľnosť vlastností relativní a pro daný sledovaný materiál se určuje porovnáním s jiným materiálem, obráběným stejným nástrojem za stejných pracovních podmínek. Srovnávacím kritériem pak může být teplota řezání, utváření třísky, velikost řezných sil (odporů), struktura povrchu obrobené plochy nebo, nejčastěji, velikost řezné rychlosti při zvolené trvanlivosti v_{cT} (obvyklé hodnoty trvanlivosti: 45, 30 nebo 15 minut). Pokud je obrobiteľnosť posuzována hodnotou v_{cT} , jedná se prakticky o vyhodnocování úběru obráběného materiálu (velikost objemu materiálu odebraná za jednotku času) pomocí daného nástroje při smluveném konstantním průřezu třísky (např. pro podélné soustružení: šířka záběru ostří $a_p = 2,5$ mm, posuv na otáčku $f = 0,25$ mm), v daném řezném prostředí.

Pro potřeby vyhodnocování obrobiteľnosti jsou technické konstrukční materiály rozděleny do devíti základních skupin, označovaných malými písmeny abecedy:

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

V jednotlivých skupinách je vždy vybrán jeden konkrétní materiál, který slouží jako etalon obrobiteľnosti a ve vztahu k tomuto materiálu je pak stanovována relativní obrobiteľnost všech ostatních materiálů celé skupiny (např. pro skupinu ocelí je etalonovým materiálem ušlechtilá uhlíková ocel 12 050.1 podle ČSN 41 1250). Materiály každé skupiny jsou děleny do tříd a to na základě indexu obrobiteľnosti, daného vztahem:

$$i_o = \frac{v_{c15}}{v_{c15etalonu}} [-]$$

kde: v_{c15} [m.min⁻¹] - řezná rychlost při trvanlivosti T = 15 minut pro sledovaný materiál,

$v_{c15etalonu}$ [m.min⁻¹] - řezná rychlost při trvanlivosti T = 15 minut pro etalonový materiál.

Základní skupiny se dále rozdělují do dvaceti tříd obrobitelnosti a jednotlivé třídy obrobitelnosti jsou odstupňovány podle geometrické řady s kvocientem $q = 10^{1/10} = 1,2589$.

Tab. 2.1 Třídy obrobitelnosti [2]

Index obrobitelnosti i_o			Materiál			
Vyjádřeno kvocientem	Střed	Rozsah	Litiny	Oceli	Slitiny	
					mědi	hliníku
$1,26^{-13}$	0,050	0,045÷0,054		1b		
$1,26^{-12}$	0,065	0,055÷0,069		2b		
$1,26^{-11}$	0,080	0,070÷0,089		3b		
$1,26^{-10}$	0,10	0,09÷0,11	1a	4b		
$1,26^{-9}$	0,13	0,12÷0,14	2a	5b	2c	
$1,26^{-8}$	0,16	0,15÷0,17	3a	6b	3c	
$1,26^{-7}$	0,20	0,18÷0,22	4a	7b	4c	
$1,26^{-6}$	0,25	0,23÷0,28	5a	8b	5c	4d
$1,26^{-5}$	0,32	0,29÷0,35	6a	9b	6c	5d
$1,26^{-4}$	0,40	0,36÷0,44	7a	10b	7c	6d
$1,26^{-3}$	0,50	0,45÷0,56	8a	11b	8c	7d
$1,26^{-2}$	0,63	0,57÷0,71	9a	12b	9c	8d
$1,26^{-1}$	0,80	0,72÷0,89	10a	13b	10c	9d
$1,26^0$	1,00	0,90÷1,12	11a	14b	11c	10d
$1,26^1$	1,26	1,13÷1,41	12a	15b	12c	11d
$1,26^2$	1,59	1,42÷1,78	13a	16b	13c	12d
$1,26^3$	2,00	1,79÷2,24	14a	17b	14c	13d
$1,26^4$	2,50	2,25÷2,82		18b	15c	14d
$1,26^5$	3,15	2,83÷3,55		19b		15d
$1,26^6$	4,00	3,56÷4,47		20b		16d

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 OPTIMALIZACE TECHNOLOGICKÉHO PROCESU SOUSTRUŽENÍ [1],[5]

Optimalizací se rozumí činnost, při níž se hledá nejlepší, nejvhodnější a nejlépe vyhovující možnost řešení, nebo nastavení procesů při zachování vymezených podmínek. Jedná se o snahu dosáhnout optimálního průběhu jednotlivých procesů tak, aby bylo dosaženo stanoveného cíle. Tato činnost může být prováděna:

- a) - na základě solidního logického rozboru,
- b) - rozhodnutí jsou učiněna náhodně, zkusmo, intuitivně, nebo na základě praktických zkušeností,
- c) - aplikací matematických metod.

Velmi často se rozhodnutí a návrhy řezných podmínek v technologii obrábění provádějí na základě intuice, praktických zkušeností, nebo i zkusmo, kde například řezné podmínky jsou voleny na základě zkušeností bez hlubší analýzy obráběcího procesu a ekonomických faktorů.

Výpočet řezné rychlosti ze vztahů (2.26) a (2.28) není při současné úrovni výpočetní techniky náročný, ale zjistit všechny faktory, které ve vzorci vystupují, je velmi náročné a představuje to velké množství experimentálních měření v proměnlivých podmínkách. Určování řezných podmínek tímto způsobem se vyplatí pouze v hromadné a velkosériové výrobě, kdy zvýšení produktivity práce převáží náklady spojené s takto náročným určením řezných podmínek.

Jednou z možností jak dosáhnout přesných informací o kvalitě a úrovni navrhovaných řešení, je aplikace optimalizačních metod na řešení daného problému. Obvykle má daná úloha mnoho řešení a úkolem je najít takové, aby výsledek byl optimální z hlediska požadovaných kritérií.

Při volbě řezných podmínek se vychází především z nutnosti dodržení následujících zásad:

- řezné podmínky musí zajistit splnění kvalitativních a kvantitativních požadavků na obráběný dílec,
- velikost průřezu třísky musí být v souladu s tuhostí soustavy,

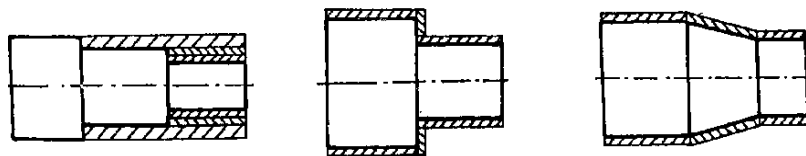
- složky řezného odporu nesmí překročit maximálně přípustné síly jednotlivých směrů,
- výkon řezání musí být menší než užitečný výkon elektromotoru stroje,
- nesmí být překročena řezivost nástroje,
- musí být dodržena minimálně přípustná výrobnost stroje za časovou jednotku,
- řezné parametry musí být v mezích přípustných intervalů,
- při obrábění na čisto nesmí být překročena limitní hodnota posuvu, daná požadovanou drsností povrchu.

3.1 TRVANLIVOST NÁSTROJE PŘI OBRÁBĚNÍ VÍCE PRVKŮ

Postupné obrábění více různých prvků na polotovaru dílce jedním nástrojem je charakteristické zejména pro číslicově řízenou výrobní techniku. Uvedený případ nastane při obrábění válcových, kuželových, nebo čelních ploch a při rozdělení celkového přídávku na více prvků. Dále to jsou rozdílné řezné podmínky, které lze nastavovat během každé operace, zejména řezná rychlost, hloubka záběru ostří a posuv nástroje, které se nastavují s ohledem na možnosti NC stroje.

Jedná se zejména o tyto případy obrábění:

- osazený hřídel,
- obrábění válcových a čelních ploch,
- obrábění válcových a kuželových ploch,
- kombinace uvedených případů.



Obr. 3.1 Příklady obrábění více prvků [1]

V programu NC stroje jsou voleny různé řezné podmínky pro každý jednotlivý úsek obrábění a tím je stanovení periody trvanlivosti nástroje a určení periody výměny nástroje ještě komplikovanější.

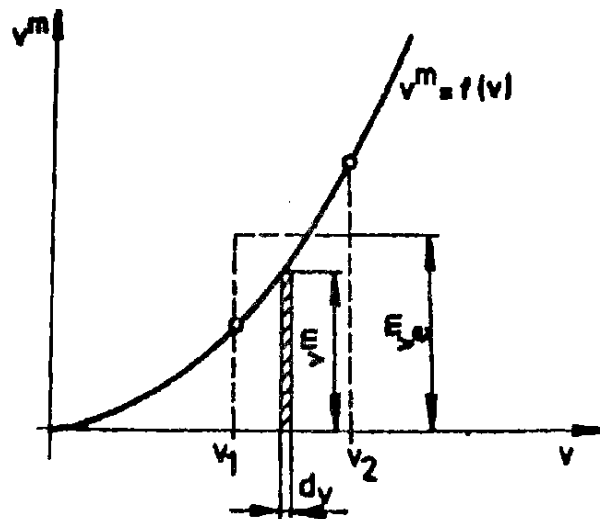
Pro případy, kdy se obrábí kuželové, nebo čelní plochy a není možné na stroji nastavit konstantní řeznou rychlost, je nutné vypočítat pro každý takový úsek ekvivalentní průměr obrábění. Je to takový průměr válcové plochy, kdy při obrábění ve stejné délce jako je původní čelní, nebo kuželová plocha a při stejných řezných podmínkách dojde ke stejnému otupení nástroje.

Při stanovení ekvivalentního průměru u obrábění čelních a kuželových ploch se předpokládá, že funkční závislost $T = f(v_c)$ je v rozmezí průměru D_1 až D_2 určena ekvivalentní řeznou rychlostí v_{ce} , takže platí:

$$T \cdot v_e^m = C_T$$

Střední hodnota v_e^m se určí ze závislosti $v_e^m = f(v_c)$ a převedením plochy pod touto křivkou v rozmezí řezných rychlostí v_{c1} , v_{c2} na obdelník o výšce v_e^m , platí:

$$\int_{v_{c1}}^{v_{c2}} v_c^m dv_c = (v_{c2} - v_{c1}) \cdot v_e^m$$



Obr.3.2 Určení střední hodnoty v_{ce} [1]

Provedením a úpravou rovnice je ekvivalentní průměr D_e :

$$D_e = D_1 \left\{ \frac{[\xi^{m+1} - 1]}{(m+1)(\xi - 1)} \right\}^{\frac{1}{m}}, \quad (3.1)$$

kde: $\xi = \frac{D_2}{D_1}$ ($D_2 > D_1$),

kde: D_2, D_1 - je maximální a minimální průměr obráběné kuželové, nebo čelní plochy.

V další fázi se vypočítá pro každý úsek obrábění řezná rychlost v_c :

$$v_{ci} = \frac{C_v}{a_{pi}^{x_v} \cdot f_i^{y_v}},$$

nebo se provede přepočítání na optimální trvanlivost:

$$v_{c_{opt}} = v_c \left(\frac{T}{T_{opt}} \right)^{\frac{1}{m}},$$

kde se za T_{opt} dosadí:

- pro minimální náklady vztah (2.26) $T_{optN} = \frac{60 \cdot B}{E} \cdot \lambda \cdot (m - 1)$,
- pro maximální výrobnost vztah (2.28) $T_{optV} = (m - 1) \cdot t_{Ax} \cdot \lambda$.

Z takto vypočtených řezných rychlostí se stanoví pro jednotlivé úseky teoretické otáčky vřetene:

$$n_i = \frac{10^3 \cdot v_c}{\pi \cdot D_i} \text{ [ot.min}^{-1}\text{]},$$

a z praktické řady otáček, nastavitelných v průběhu cyklu na NC stroji, se zvolí skutečné otáčky pro obrábění. Dále se vypočítají skutečné řezné rychlosti, které odpovídají zvoleným otáčkám pro jednotlivé úseky:

$$v_{ci} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n_i}{10^3} \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$$

Z poměru teoretických (optimálních) a skutečných řezných rychlostí se vypočítá trvanlivost nástroje, která odpovídá řezným podmínkám při obrábění daného úseku:

$$T = T_{teor} \left(\frac{v_{teor.}}{v_c} \right)^m \quad [\text{min}]$$

Pro jednotlivé úseky se dále stanoví strojní časy ze vztahu:

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

Výsledná trvanlivost nástroje, který obrábí v jednom cyklu k prvků na součásti a při různých řezných podmínkách je:

$$T_v = \frac{\sum_{i=1}^k t_{ASi}}{\sum_{i=1}^k \frac{t_{ASi}}{T}} \quad [\text{min}], \quad (3.2)$$

a perioda výměny nástroje, která odpovídá trvanlivosti nástroje T_v , daná počtem vyrobených kusů je:

$$T_k = \frac{T_v}{\sum_{i=1}^k t_{ASi}} \quad [\text{ks}], \quad (3.3)$$

3.2 KONVENČNÍ OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PARAMETRŮ PRO SOUSTRUŽENÍ

Pokud se hledají optimální hodnoty řezné rychlosti a posuvu pro soustružení, lze tyto hodnoty stanovit následujícím způsobem:

Nejdříve se stanoví limitní posuv f_M , tj. posuv maximálně přípustný pro daný případ obrábění. Může se přitom vycházet z limitních hodnot posuvů definovaných:

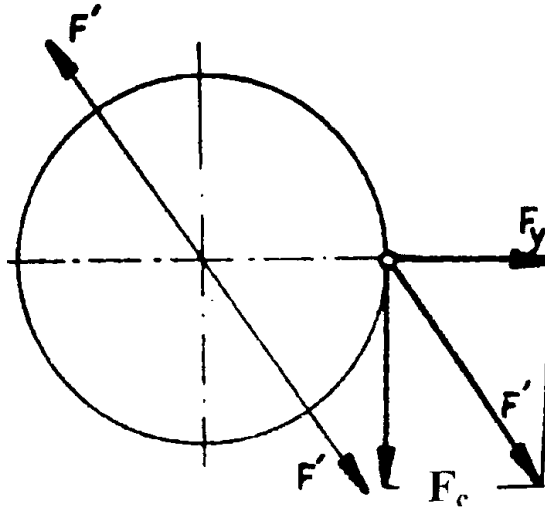
- a) posuv definovaný empirickým vztahem:

$$f_1 \leq c_f \cdot r_\varepsilon^{x_\varepsilon} \cdot a^{x_a} \quad (3.4)$$

- b) omezení posuvu při soustružení dané maximálně přípustnou drsností povrchu R_a :

$$f_2 \leq \left(\frac{Ra \cdot r_\varepsilon}{32.5} \right)^{0,5} \quad (3.5)$$

- c) posuv daný tuhostí soustavy



Obr. 3.3 Síla způsobující deformaci součástky [1]

Tuhost soustavy je dána: $j_s = \frac{F'}{\Delta y}$

Podle obrázku 3.3 je síla $F' = \sqrt{F_c^2 + F_y^2}$

Označí se $\frac{F_y}{F_c} = \beta$ a dosadí: $F' = \sqrt{F_c^2 + (\beta \cdot F_c)^2} = F' = \sqrt{1 + \beta^2} \cdot F_c = F_c \cdot \lambda_s$,

kde pro $\beta = 0,4$ je $\lambda_s \cong 1,08$

Dosazením do rovnice pro tuhost:

$$j_s = \frac{\lambda_s \cdot c_{Fc} \cdot \Delta a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}}}{\Delta y},$$

Kde: Δa_p - je nepřesnost polotovaru,

Δy - nepřesnost po obrábění ($\varepsilon = \frac{\Delta a_p}{\Delta y}$ je zpřesnění)

Limitní posuv z hlediska tuhosti soustav je:

$$f_3 = \left[\frac{j_s}{\lambda_s \cdot c_{Fc} \cdot \left(\frac{\Delta a_p}{\Delta y} \right)} \right]^{y_{Fc}} = \left(\frac{j_s}{\lambda_s \cdot c_{Fc} \cdot \varepsilon} \right)^{y_{Fc}} \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$$

Skutečný posuv musí být menší než limitní:

$$f_3 \leq \left(\frac{j_s}{f \cdot c_{Fc} \cdot \varepsilon} \right)^{y_{Fc}} \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]} \quad (3.6)$$

• d) limitní hodnota tečné složky řezné síly $F_{c_{\text{lim}}}$:

$$F_{c_{\text{lim}}} \leq F_c = c_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \Rightarrow f_4 \leq \left(\frac{F_{c_{\text{lim}}}}{c_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}}} \right)^{\frac{1}{y_{Fc}}} \quad (3.7)$$

Limitní posuv f_M je pak dán nejmenším posuvem z vypočtených hodnot podle rovnic (3.4), (3.5), (3.6) a (3.7). Jedná se o posuv maximálně přípustný pro dané podmínky obrábění, který se nazývá technologický posuv f_M .

Pokud je známa hodnota limitního (technologického) posuvu, lze vypočítat optimální hodnoty řezné rychlosti a posuvu.

Požadavku hospodárného využití řezivosti nástroje musí řezné podmínky v_c , a_p a f odpovídat rovnici (2.7):

$$v_T = \frac{C_v}{T_{opt}^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} = \frac{C_1}{f^{y_v}} \text{ [m.min}^{-1}\text{]} \quad (3.8)$$

Výkon elektromotoru bude využit tehdy, když budou řezné podmínky splňovat vztah:

$$F_{c_{\text{lim}}} \leq F_c = c_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}}$$

$$P_{ef} = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} = \frac{c_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} \text{ [kw]} \quad (3.9)$$

Splněním obou podmínek současně bude zaručeno dosažení maximálního hospodár-
ného úběru.

Pro daný případ obrábění se upraví rovnice (3.8) a (3.9) jako $v = f(f)$:

$$v_T = \frac{C_1}{f^{y_v}} \quad v_C = \frac{C_2}{f^{y_{Fc}}}$$

Úprava na lineární tvar:

$$\ln v_T = \ln C_1 - y_v \cdot \ln f \quad (3.10)$$

$$\ln v_C = \ln C_2 - y_{Fc} \cdot \ln f \quad (3.11)$$

Pokud se vynesou rovnice (3.10) a (3.11) do grafu, určí průsečík obou přímek hodno-
ty řezné rychlosti a posuvu, pro které jsou splněny obě rovnice a tedy jsou pro daná ome-
zení optimální.

Separace proměnných z upravených rovnic (3.8) a (3.9):

$$\text{a) optimální hodnota posuvu: } f_{opt} = \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{\frac{1}{(y_{Fc} - y_v)}} \quad (3.12)$$

$$\text{b) optimální řezná rychlost: } v_{opt} = \left(\frac{C_2^{y_v}}{C_1^{y_{Fc}}} \right)^{\frac{1}{(y_v - y_{Fc})}} \quad (3.13)$$

Řešení aplikací determinantů:

Rovnice upravené na lineární tvar:

$$\ln v_T - y_v \cdot \ln f = \ln C_1$$

$$\ln v_C - y_{Fc} \cdot \ln f = \ln C_2$$

Řešením rovnic pomocí determinantů a úpravou jsou optimální hodnoty řezné rychlos-
ti a posuvu:

$$v_{opt} = \exp \frac{y_{Fc} \cdot \ln C_1 - y_v \cdot \ln C_2}{y_{Fc} - y_v} \quad (3.14)$$

$$f_{opt} = \exp \frac{\ln C_2 - \ln C_1}{y_{Fc} - y_v} \quad (3.15)$$

Ve všech výše uvedených variantách řešení v případě, že $f_{opt} \geq f_M$, je nutné vycházet pro určení v_{copt} ze závislosti s menší hodnotou exponentu, tj. hodnoty y_{Fc} a y_v . Obvykle platí, že $y_{Fc} > y_v$, a proto se řezná rychlost stanoví pro tento případ ze závislosti pro řezivost nástroje:

$$v_{1opt} = \frac{C_1}{f_M^{y_v}}$$

Reálné hodnoty řezných parametrů použitelné pro praktické použití jsou optimální řezná rychlost v_{1opt} a limitní posuv f_M .

Pokud vychází vypočítaná hodnota optimálního posuvu $f_{opt} \leq f_M$, platí pro praktické použití optimální řezná rychlost v_{copt} a optimální posuv f_{opt} .

4 VÝPOČET OPTIMÁLNÍCH ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO VÁLCOVOU PLOCHU PODLE ZADANÝCH HODNOT [1], [5]

Diplomová práce není zaměřena na výrobu součásti, ale na stanovení optimálních řezných podmínek na základě zadaných hodnot a výpočtových vztahů. Tyto vztahy se použijí při výpočtech pro podélné soustružení válcové plochy o charakteristických rozměrech D , L , l , která je uvedena na obr. 2.15 v kapitole 2. Je potřeba vypočítat optimální řeznou rychlost v_{copt} a optimální posuv f_{opt} pro soustružení válcové plochy o průměru 60 mm.

Zadáno:

- materiál obrobku - ČSN 12 050.1,
- rozměry - kruhová tyč o průměru 60 mm a délky 400 mm,
- nástroj - vyměnitelná břitová destička SK P30, $r_{\epsilon} = 0,8\text{mm}$,
- náklady na použití jednoho břitu $B = 48$ [Kč.břit⁻¹],
- náklady na jednu hodinu práce stroje $E = 460$ [Kč.hod⁻¹],
- čas na výměnu nástroje $t_{\text{AX}} = 4.5$ min.,
- koeficient řezání $\lambda = \frac{l}{L} = \frac{400}{412} = 0,9709$,
- koeficient zpřesnění $\epsilon = 4$,
- požadovaná drsnost $R_a = 6,3$, [μm],
- tuhost soustavy $j_s = 4250$ N.min⁻¹,
- výkon elektromotoru stroje $P_{\text{ef}} = 10$ Kw,
- hloubka záběru ostří $a_p = 6$ mm,
- řezná síla $F_{\text{clim}} = 4000$ N,
- ostatní parametry a konstanty - $\lambda_s = 1,08$, $m = 2,9$, $y_{\text{vc}} = 0,25$, $x_{\epsilon} = 0,83$, $x_{\text{Fc}} = 1$, $C_{\text{Fc}} = 1580$, $x_{\text{ap}} = 0,338$, $x_{\text{vc}} = 0,20$, $c_f = 0,225$, $c_{\text{vc}} = 385$, $y_{\text{Fc}} = 0,78$.

4.1 Stanovení optimální trvanlivosti podle kriteria maximální výrobnosti:

Pro výpočet se použije vztah: (2.28) $T_{optV} = (m-1) \cdot t_{Ax} \cdot \lambda$

Po dosazení: $T_{optV} = (2,9-1) \cdot 4,5 \cdot 0,9709 = 8,3$ min.

Optimální trvanlivost pro zvolené kriterium je 8,3 minuty.

Výpočet limitního posuvu:

a) empirický vztah: $f_1 \leq c_f \cdot r_\varepsilon^{x_\varepsilon} \cdot a^{x_a}$ po dosazení: $f_1 \leq 0,225 \cdot 0,8^{0,83} \cdot 6^{0,338} = 0,343$ mm.ot⁻¹.

b) drsnost: $f_2 \leq \left(\frac{Ra \cdot r_\varepsilon}{32,5} \right)^{0,5}$ po dosazení: $f_2 \leq \left(\frac{6,3 \cdot 0,8}{32,5} \right)^{0,5} = 0,394$ mm.ot⁻¹.

c) tuhost: $f_3 \leq \left(\frac{j_s}{f \cdot c_{F_c} \cdot \varepsilon} \right)^{\frac{1}{y_{F_c}}}$ po dosazení: $f_3 \leq \left(\frac{4250}{1,08 \cdot 1580,4} \right)^{\frac{1}{0,78}} = 0,545$ mm.ot⁻¹.

d) tečná síla: $f_4 \leq \left(\frac{F C_{lm}}{c_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}}} \right)^{\frac{1}{y_{F_c}}}$ po dosazení: $f_4 \leq \left(\frac{4000}{1580,6} \right)^{\frac{1}{0,78}} = 0,331$ mm.ot⁻¹.

Nejmenší hodnotu posuvu má posuv f_4 , vypočítaný ze vztahu pro tečnou sílu a jedná se tedy o posuv limitní, $f_4 = f_M = 0,331$ mm.ot⁻¹.

Hospodárné využití řezivosti nástroje se vypočítá ze vztahu (2.7):

$$v_T = \frac{C_v}{T_{opt}^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} = \frac{C_1}{f^{y_v}} \Rightarrow C_1 = \frac{C_{vc}}{T_{opt}^{1/m} \cdot a_p^{x_v}} \quad \text{po dosazení:}$$

$$C_1 = \frac{400}{8,3^{2,9} \cdot 6^{0,20}} = 134,7$$

$$P_{ef} = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} = \frac{c_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \cdot v_c}{6 \cdot 10^4}, \quad \text{pro } v_c \text{ platí: } v_c = \frac{C_2}{f^{y_F}} \Rightarrow C_2 = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot P_{ef}}{c_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}}}$$

Po dosazení: $C_2 = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot 10}{1580.6} = 63,3$

Grafické řešení:

Podle rovnic (2.10) a (2.11):

Rovnice 1: $\ln v_T = \ln C_1 - y_v \cdot \ln f$

Rovnice 2: $\ln v_c = \ln C_2 - y_{Fc} \cdot \ln f$

Dekadický logaritmus:

Rovnice 1: $\log v_T = \log C_1 \cdot 10^{2y_v} - y_v \cdot \log f$

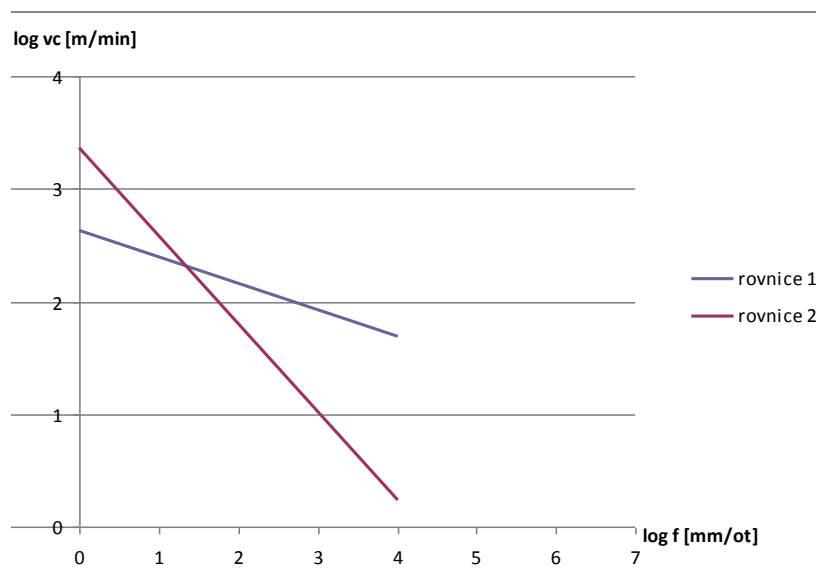
Rovnice 2: $\log v_c = \log C_2 \cdot 10^{2y_{Fc}} - y_{Fc} \cdot \log f$

Po dosazení:

Rovnice 1: $\log v_T = \log 134,7 \cdot 10^{2 \cdot 0,25} - 0,25 \cdot \log f$

Rovnice 2: $\log v_c = \log 63,3 \cdot 10^{2 \cdot 0,78} - 0,78 \cdot \log f$

Rovnice 1	log f	0,00	4,00	Rovnice 2	log f	0,00	4,00
	log vt	2,63	1,69		log vc	3,36	0,24



Obr. 4.1. Optimální hodnoty rychlosti a posuvu určí průsečík obou přímek

Řešení aplikací determinantů:

$$\text{Z rovnice (3.14) } v_{opt} = \exp \frac{y_{Fc} \cdot l_{nC_1} - y_v \cdot l_{nC_2}}{y_{Fc} - y_v},$$

$$\text{po dosazení: } v_{opt} = \exp \frac{0,78 \cdot l_n 134,7 - 0,25 \cdot l_n 63,3}{0,78 - 0,25} = 192,3 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$$

$$\text{z rovnice (3.15) } f_{opt} = \exp \frac{l_{nC_2} - l_{nC_1}}{y_{Fc} - y_v}$$

$$\text{po dosazení } f_{opt} = \exp \frac{l_n 63,3 - l_n 134,7}{0,78 - 0,25} = 0,241 \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$$

Aplikace separace proměnných na řešení:

Optimální rezná rychlost:

$$v_{opt} = \left(\frac{C_2^{y_v}}{C_1^{y_{Fc}}} \right)^{\frac{1}{(y_v - y_{Fc})}} \text{ po dosazení: } v_{opt} = \left(\frac{63,3^{0,25}}{134,7^{0,78}} \right)^{\frac{1}{(0,25 - 0,78)}} = 192,3 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$$

Optimální posuv:

$$f_{opt} = \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{\frac{1}{(y_{Fc} - y_v)}} \text{ po dosazení: } f_{opt} = \left(\frac{63,3}{134,7} \right)^{\frac{1}{(0,78 - 0,25)}} = 0,241 \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$$

Vypočítané reálné rezné podmínky:

Protože z výpočtů pro kritérium maximální výrobnosti je hodnota optimálního posuvu menší než posuv maximální ($f_{opt} \leq f_M$), bude pro praktické využití optimální rezná rychlost $v_{opt} = 192,3 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a posuv $f_{opt} = 0,241 \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$. Otáčky n_{opt} podle vypočtených hodnot budou $n_{opt} = 1020 \text{ min}^{-1}$.

Výpočet strojního času pro obrobení součásti:

$$t_{AS} = \frac{l_n + L + l_p}{n \cdot f} \text{ po dosazení: } t_{AS} = \frac{412}{1020 \cdot 0,241} = 1,7 \text{ min.}$$

Počet obrobených dílců na jednu trvanlivost:

Podle vzorce (3.3): $T_k = \frac{T_v}{t_{AS}} \cdot \lambda$ [ks], po dosazení: $T_k = \frac{8,3}{1,7} \cdot 0,9709 = 4,74$ ks,

Počet výměn nástroje na obrobení jednoho kusu součásti:

Ze vztahu (2.14) $z_v = \frac{t_{AS}}{T} \cdot \lambda$ [-], po dosazení $z_v = \frac{1,7}{8,3} \cdot 0,9709 = 0,199$

Přímé náklady na obrobení jednoho dílce:

Podle vzorce (4.1): $A = t_{AS} \cdot \frac{E}{60} + B \cdot z_v$

Kde: A [Kč.ks⁻¹] - přímé náklady na obrobení jednoho kusu,

t_{AS} [min] - čas automatický strojní,

E [Kč.hod⁻¹] - náklady na hodinu práce stroje,

B [Kč] - náklady na použití jednoho břitu,

z_v [-] - počet výměn nástroje vztažených na obrobení 1 kusu výrobku.

Po dosazení: $A = 1,7 \cdot \frac{460}{60} + \frac{48 \cdot 1,7 \cdot 0,9709}{8,3} = 22,58$ Kč

4.2 Stanovení optimální trvanlivosti podle kriteria minimálních výrobních nákladů:

Pro výpočet se použije vztah: (2.26) $T_{optN} = \frac{60 \cdot B}{E} \cdot \lambda \cdot (m - 1)$

Po dosazení: $T_{optN} = \frac{60 \cdot 48}{460} \cdot 0,9709 \cdot (2,9 - 1) = 11,56$ min.

Výpočet limitního posuvu:

Limitní posuv bude mít stejnou hodnotu jako u výpočtů pro maximální výrobnost ze vztahu pro tečnou sílu, limitní posuv tedy bude posuv $f_4 = f_M = 0,331 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$.

d) tečná síla: $f_4 \leq \left(\frac{F C_{im}}{C_{Fc} \cdot a_p} \right)^{\frac{1}{y_{Fc}}}$ po dosazení: $f_4 \leq \left(\frac{4000}{1580,6} \right)^{\frac{1}{0,78}} = 0,331 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$.

Hospodárné využití řezivosti nástroje se vypočítá ze vztahu (2.7):

$$v_T = \frac{C_v}{T_{opt}^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} = \frac{C_1}{f^{y_v}} \Rightarrow C_1 = \frac{C_{vc}}{T_{opt}^{1/m} \cdot a_p^{x_{vc}}} \quad \text{po dosazení:}$$

$$C_1 = \frac{400}{11,56^{\frac{1}{2,9}} \cdot 6^{0,20}} = 120,2$$

$$P_{ef} = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} = \frac{c_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot v_c}{6 \cdot 10^4}, \quad \text{pro } v_c \text{ platí: } v_c = \frac{C_2}{f^{y_{Fc}}} \Rightarrow C_2 = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot P_{ef}}{c_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}}}$$

Po dosazení: $C_2 = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot 10}{1580 \cdot 6} = 63,3$

Grafické řešení:

Podle rovnic (2.10) a (2.11):

Rovnice 1: $\ln v_T = \ln C_1 - y_v \cdot \ln f$

Rovnice 2: $\ln v_c = \ln C_2 - y_{Fc} \cdot \ln f$

Dekadický logaritmus:

Rovnice 1: $\log v_T = \log C_1 \cdot 10^{2y_v} - y_v \cdot \log f$

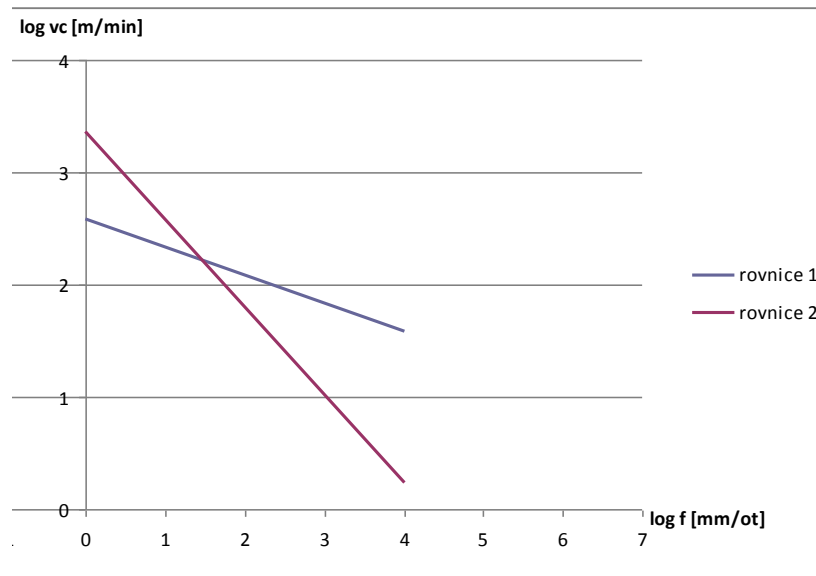
Rovnice 2: $\log v_c = \log C_2 \cdot 10^{2y_{Fc}} - y_{Fc} \cdot \log f$

Po dosazení:

Rovnice 1: $\log v_T = \log 120,2 \cdot 10^{2 \cdot 0,25} - 0,25 \cdot \log f$

Rovnice 2: $\log v_c = \log 63,3 \cdot 10^{2 \cdot 0,78} - 0,78 \cdot \log f$

Rovnice 1	log f	0,00	4,00	Rovnice 2	log f	0,00	4,00
	log vt	2,58	1,58		log vc	3,36	0,24



Obr. 4.2. Optimální hodnoty rychlosti a posuvu určí průsečík obou přímek

Řešení aplikací determinantů:

$$\text{Z rovnice (3.14)} \quad v_{opt} = \exp \frac{y_{Fc} \cdot l_n C_1 - y_v \cdot l_n C_2}{y_{Fc} - y_v},$$

$$\text{po dosazení: } v_{opt} = \exp \frac{0,78 \cdot l_n 120,2 - 0,25 \cdot l_n 63,3}{0,78 - 0,25} = 162,3 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$$

$$\text{z rovnice (3.15)} \quad f_{opt} = \exp \frac{l_n C_2 - l_n C_1}{y_{Fc} - y_v}$$

$$\text{po dosazení } f_{opt} = \exp \frac{l_n 63,3 - l_n 120,2}{0,78 - 0,25} = 0,298 \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$$

Aplikace separace proměnných na řešení:

Optimální rezná rychlost:

$$v_{opt} = \left(\frac{C_2^{y_v}}{C_1^{y_{Fc}}} \right)^{\frac{1}{(y_v - y_{Fc})}} \quad \text{po dosazení: } v_{opt} = \left(\frac{63,3^{0,25}}{120,2^{0,78}} \right)^{\frac{1}{(0,25 - 0,78)}} = 162,3 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$$

Optimální posuv:

$$f_{opt} = \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{\frac{1}{(y_{fc} - y_v)}} \text{ po dosazení: } f_{opt} = \left(\frac{63,3}{120,2} \right)^{\frac{1}{(0,78-0,25)}} = 0,298 \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$$

Protože z výpočtů pro kritérium minimálních výrobních nákladů je hodnota optimálního posuvu menší než posuv maximální ($f_{opt} \leq f_M$), bude pro praktické použití optimální rezná rychlost $v_{opt} = 162,3 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a posuv $f_{opt} = 0,298 \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$. Otáčky n_{opt} podle vypočtených hodnot budou $n_{opt} = 861 \text{ min}^{-1}$.

Výpočet strojního času pro obrobění součásti:

$$t_{AS} = \frac{l_n + L + l_p}{n \cdot f} \text{ po dosazení: } t_{AS} = \frac{412}{861 \cdot 0,298} = 1,61 \text{ min.}$$

Perioda výměny nástroje daná počtem vyrobených kusů:

$$\text{Podle vzorce (3.3): } T_k = \frac{T_v}{t_{AS}} \cdot \lambda \text{ [ks], po dosazení: } T_k = \frac{11,56}{1,61} \cdot 0,9709 = 6,97 \text{ [ks],}$$

Počet výměn nástroje na obrobění jednoho kusu součásti:

$$\text{Ze vztahu (2.14): } z_v = \frac{t_{AS}}{T} \cdot \lambda[-], \text{ po dosazení } z_v = \frac{1,61}{11,56} \cdot 0,9709 = 0,135$$

Přímé náklady na obrobění jednoho dílce:

Podle vzorce (4.1):

$$A = t_{AS} \cdot \frac{E}{60} + B \cdot z_v \text{ Po dosazení: } A = 1,61 \cdot \frac{460}{60} + \frac{48 \cdot 1,61 \cdot 0,9709}{11,56} = 18,8 \text{ Kč}$$

5 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

TAB.5.1 Vypočítané řezné parametry a hodnoty

KRITERIUM			
MAXIMÁLNÍ VÝROBNOST	VYPOČÍTANÉ HODNOTY	MINIMÁLNÍ NÁKLADY	VYPOČÍTANÉ HODNOTY
OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOST $T_{opt} [\text{min}]$	8,3	OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOST $T_{opt} [\text{min}]$	11,56
ŘEZNÁ RYCHLOST $v_{copt} [\text{m.min}^{-1}]$	192,3	ŘEZNÁ RYCHLOST $v_{copt} [\text{m.min}^{-1}]$	162,3
POSUV $f_{opt} [\text{mm.ot}^{-1}]$	0,241	POSUV $f_{opt} [\text{mm.ot}^{-1}]$	0,298
OTIMÁLNÍ OTÁČKY $n_{opt} [\text{min}^{-1}]$	1020	OTIMÁLNÍ OTÁČKY $n_{opt} [\text{min}^{-1}]$	861
STROJNÍ ČAS $t_{AS} [\text{min}]$	1,7	STROJNÍ ČAS $t_{AS} [\text{min}]$	1,61
POČET DÍLCŮ NA 1T [ks]	4,74	POČET DÍLCŮ NA 1T [ks]	6,97
POČET VÝMĚN NÁSTROJE NA 1ks	0,199	POČET VÝMĚN NÁSTROJE NA 1ks	0,135
NÁKLADY NA 1 KS DÍLCE $[\text{Kč.ks}^{-1}]$	22,58	NÁKLADY NA 1 KS DÍLCE $[\text{Kč.ks}^{-1}]$	18,8

Naměřené hodnoty byly vypočítány podle obou kritérií optimalizace pro technologii soustružení na jeden záběr břitu nástroje. Kriterium maximální výrobnosti se používá méně často, protože se dosáhne maximálního možného úběru materiálu na daném stroji při použití daného nástrojového materiálu bez ohledu na hospodárnost výroby součásti. Toto kritérium se používá například v případě, že z důvodu výpadku nebo výskytu poruchy, se snížená produkce ve výrobě vyrovnává zvýšením řezných podmínek a využívá se maximální výrobnosti stroje. Při používání maximálních možných řezných parametrů je zatěžován nástroj a obráběcí stroj mnohem více a také je mnohem větší spotřeba energií. Snížení času se nejvíce projeví při obrábění vysokými řeznými rychlostmi (v_c), nižšími posuvovými rychlostmi (v_f) a malých hodnot hloubek záběru ostří (a_p).

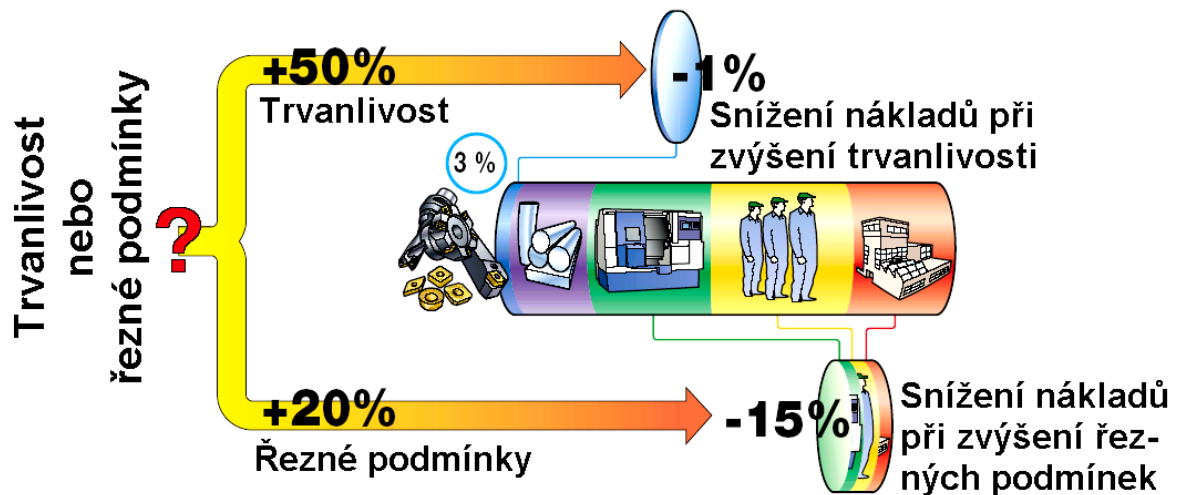
V případě obrábění výše uvedené součásti došlo k tomu, že strojní čas t_{AS} pro kritérium maximální výrobnosti je dokonce větší, než strojní čas t_{AS} pro kritérium minimálních výrobních nákladů. Přesto, že zvolením kritéria pro maximální výrobnost dojde ke snížení trvanlivosti břitu a zvýšení nákladů na energie i nástroj, čas pro obrobění součásti je větší, než u kritéria minimálních nákladů. Úspora času pro tento konkrétní případ výpočtu řezných podmínek s použitím kritéria pro maximální výrobnost nebyla dosažena, ale naopak se čas potřebný pro obrábění ještě prodloužil. Navíc se ještě k tomu podstatně snížil počet takto obroběných součástí na jeden břit (trvanlivost) nástroje o více jak dva kusy.

Samotné obrábění je velmi složitý proces a zvolené řezné parametry nejvíce záleží na materiálu obrobku, materiálu nástroje a řezných podmínkách. Velmi také záleží na tom, jaký druh operace se provádí a jestli se jedná o hrubovací, nebo dokončovací obrábění.

Kritérium maximální výrobnosti se volí právě proto, aby došlo ke snížení času potřebného k obrábění, ale to se v tomto případě nestalo. Došlo k tomu z toho důvodu, že zvolená hloubka záběru ostří měla poměrně velkou hodnotu a posuvová rychlost byla také podstatně vyšší u obrábění pro kritérium minimálních nákladů, než pro kritérium maximální výrobnosti. Jednalo se tedy spíše o hrubování, než dokončovací obrábění s menší hodnotou hloubky záběru ostří a nižší posuvovou rychlostí.

Při obrábění této konkrétní součásti s těmito řeznými parametry, je použití kritéria maximální výrobnosti nevhodné nejenom proto, že nedojde ke snížení výrobního času, ale také proto, že se podstatně sníží trvanlivost břitu nástroje a počet obroběných součástí na jednu trvanlivost.

Řezné parametry je potřeba pro optimální využití nástroje, ale i z ekonomické úspory plynoucí z menší hodnoty strojního času a vyšší produkce zvolit na základě výpočtů podle kritéria minimálních nákladů. Tímto se dosáhne optimálních řezných podmínek a zároveň úspory času potřebného k výrobě součásti, tedy dojde ke zvýšení produktivity a trvanlivosti nástroje zároveň.



Obr. 5.1 Úspory výrobních nákladů zvýšením řezných podmínek [9]

ZÁVĚR

Diplomová práce velmi podrobně popisuje všechny v dnešní době používané nástrojové materiály, jejich vlastnosti, značení a použití. První část je zaměřena na obecné základní informace o každém druhu nástrojového materiálu. Následující části jsou zaměřeny na hospodárné použití nástrojových materiálů v procesu obrábění, jejich opotřebení a optimalizaci řezných podmínek použitím kritérií optimalizace pro technologii soustružení.

Neexistuje nástrojový materiál, který by se dal použít pro všechny skupiny obráběných materiálů, druhy operací a při velmi různých řezných podmínkách. Nástrojový materiál je vždy vyvíjen na konkrétní skupinu obráběných materiálů (oceli, litiny, slitiny mědi, slitiny hliníku aj.) a konkrétní technologii (soustružení, frézování, vrtání aj.), druh operace (dokončovací, hrubovací operace) tak, aby byl optimální poměr mezi produktivitou a hospodárností výroby. Na základě desítky let prováděného výzkumu jednotliví výrobci řezných materiálů doporučují optimální řezné podmínky a rozsahy použití nástrojových materiálů, které vyrábějí. Pro jednu skupinu obráběných materiálů se vyrábí mnoho typů nástrojových materiálů. Například v rámci jedné skupiny obráběných materiálů se používají vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů s různou zrnitostí, vzájemným poměrem jednotlivých karbidů, obsahem pojícího kovu kobaltu, druhem a tloušťkou povlaku, sledem nanášení vrstev povlaku apod. Nástrojový materiál se i v rámci jedné skupiny obráběných materiálů volí s ohledem na druh operace (hrubovací, dokončovací operace), protože pro dokončovací obrábění jsou vhodné nástrojové materiály co nejtvrdší a odolné proti tepelnému namáhání, zatímco pro hrubovací operace se používají houževnaté materiály, které lépe odolávají mechanickému tlakovému a ohybovému zatížení.

Ze všech řezných podmínek má na produktivitu obrábění, ale také na opotřebení nástroje největší vliv řezná rychlost. Obecně se zvýšení řezných podmínek vyplatí (obr.5.1), protože náklady na nástroj tvoří pouze cca 3% z celkových výrobních nákladů, takže se snížená trvanlivost břitu nástroje vykompenzuje zvýšenou produkcí a použitím dražších nástrojových materiálů, ale je vždy potřeba hledat optimální řezné podmínky tak, aby se nástrojový materiál co nejlépe využil. Příkladem může být tato diplomová práce, kde zvýšením řezné rychlosti naopak došlo ještě ke zvýšení času potřebného k obrobení válcové plochy, protože také velmi záleží na tom, jaké jsou ostatní řezné podmínky (posuvová rychlost, hloubka záběru ostří) a jaká skupina materiálů se obrábí. Zvýšením řezné rychlosti došlo k podstatnému snížení posuvové rychlosti, protože a_p byla konstantní.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. KOCMAN, K.: *Technologické procesy - obrábění*. CERM, únor 2011, s.328, ISBN 978-80-7204-722-2.
2. HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. 1. vyd. Brno: VUT Brno. 2003. 138 s.
3. ZEMČÍK, O.: *Technologická příprava výroby*. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-214-2219-X
4. HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, s.r.o., 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
5. KOCMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Druhé vydání. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, S.R.O. Brno, prosinec 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
6. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. *Materiály pro řezné nástroje*. MM Průmyslové spektrum - Speciální vydání. Zář 2004. ISSN 1212-2572., s. 84-96.
7. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. [online]. Studijní opory. VUTFSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006 [cit. 2017-04-16]. Dostupný z WWW:<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf>.
8. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. MM publishing s. r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
9. CRHAN, L. *Slinuté karbidy a jejich efektivní využití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 42 s., 2 příloh. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
10. KOCMAN, Karel. *Speciální technologie obrábění. Třetí přepracované a doplněné vydání*. Leden 2004. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM,s.r.o. Brno, 2004. 227 s. ISBN 80-214-2562-8.
11. WWW.prodejbrusiva.CZ. *Vše o broušení: Obrábění s přesností a hladkostí nedosažitelnou soustružením ani frézováním* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.prodejbrusiva.cz/brouseni-obrabeci-postup-s-presnosti-a-hladkosti-nedosazitelnou-soustruzenim-ani-frezovanim>
12. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.HOUDEK,

- CSC., Ing. Josef a Ing. Karel KOUŘIL, PH.D. Opotřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů. *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM*. 2005.
13. BROOKES, K.J.A. *Hardmetals and other Hard Materials*. Second Edition. Shrewsbury, England: European Powder Metallurgy Association, 1992. 198 p. ISBN 0 9508995 3 4.
 14. BROOKES, K.J.A. *World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard materials*. Sixth Edition. East Barnet Hertfordshire, United Kingdom: International Carbide Data, 1996. 220+528 p. ISBN 0 9508995 4 2.
 15. LEICHTFRIED, G., SAUTHOFF, G., SPRIGGS, G.E. *Refractory, Hard and Intermetallic Materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2002. 267 p. ISBN 3-540-42961-1.
 16. CHBRETOUT, V., MISSIAEN, J.M. Analysis of the evolution of the grain size distribution in WC-Co sintered materials with random set models. *Materials Science of Engineering*. 21 June 2001, 2001, A328, s. 291-296.
 17. UPADHYAYA, G.S. Materials science of cemented carbides-an overview. *Materials and Design*. 12 September 2000, 2000, 22, s. 483-489.
 18. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. BRNO: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
 19. KOČMAN, K., PROKOP, J.: *Řezné materiály pro soustružení tvrdých materiálů*. *Strojírenská technologie*, ročník VIII, č.3, s.16-20, září 2003. ISSN 1211-4162.
 20. WANG, J.; KURIYAGAWA, T. et. al. *Optimization of Cutting Conditions for Single Pass Turning Operations Using a Deterministic Approach*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Australia. 2002. Vol. 42, s. 1023-1033. ISSN: 0890-6955.
 21. KOČMAN, K.: *Influence of thermodynamic phenomena at the optimum cutting parameters when grinding*. *Manufacturing technology*. 2014, 14, 1, s. 36 – 41. ISSN 1213-2489.
 22. BOUZAKIS, K. D., PARASKEVOPOULOU, R., GIANNOPOULOS, G. *Multi-objective Optimization of Cutting Conditions in Milling Using Genetic Algorithms*. In *Proceedings of 3rd International Conference on Manufacturing Engineering*. Greece. 2008. p.763–773.
 23. PÍŠKA, Miroslav. *Trendy v PVD a CVD povlakování*. *MM Průmyslové spektrum*. 2014.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ZKRATKA	JEDNOTKA	POPIS
CVD		Chemické napařování z plynné fáze
HSC		Vysokorychlostní obrábění
HV		Tvrдость podle Vickerse
MTCVD		Středně - teplotní metoda CVD
PVD		Fyzikální napařování
SK		Slinuté karbidy
VBD		Vyměnitelné břitové destičky
a_p	[mm]	Hloubka záběru ostří
f	[mm.ot ⁻¹]	Posuv na otáčku
f_{opt}	[mm.ot ⁻¹]	Posuv na otáčku optimální
v_c	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
v_f	[mm.min ⁻¹]	Posuvová rychlost
n	[min ⁻¹]	Otáčky za minutu
t_{AS}	[min]	Čas automatický strojní
t_{AX}	[min]	Čas na výměnu nástroje a seřízení stroje
B	[Kč.břit ⁻¹]	Náklady na použití jednoho břitu
E	[Kč.hod ⁻¹]	Náklady na jednu hodinu práce stroje
λ		Koeficient řezání
R_a	[μ m]	Drsnost povrchu
z_v		Počet výměn nástroje vztažených na obrobek 1 kusu výrobku
A	[Kč.ks ⁻¹]	Přímé náklady na obrobek jednoho kusu
RO		Rychlořezná ocel

HRC		Tvrдость podle Rockwella
HIP		Vysokoteplotní izostatické lisování
Z		Životnost nástroje
PD		Polykrystalický diamant
PKNB		Polykrystalický kubický nitrid boru
q		Počet použitelných ostří břitové destičky
C_T		Konstanta charakterizující vlastnosti obráběného materiálu
m		Exponent charakterizující vlastnosti nástroje
x_v		Exponent vyjadřující vliv hloubky řezu
y_v		Exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku
N_C	[Kč]	Celkové výrobní náklady
N_S	[Kč]	Náklady na strojní práci
N_v	[Kč]	Náklady na vedlejší práci
N_n	[Kč]	Náklady na nástroj a jeho výměnu
N_{sm}	[Kč]	Náklady na minutu strojní práce
KT		Hloubka žlábků opotřebení čela
VB		Opotřebení hřbetu nástroje průměrné
ln	[mm]	Délka náběhu
lp	[mm]	Délka přeběhu