

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODERNÍ ŘEZNÉ NÁSTROJE ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ

MODERN CUTTING CEMENTED CARBIDE TOOLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JOSEF VOPAŘIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Josef Vopařil

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

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

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

Moderní řezné nástroje ze slinutých karbidů

v anglickém jazyce:

Modern cutting cemented carbide tools

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor soudobých slinutých karbidů pro obrábění technických materiálů (povlakovaných, nepovlakovaných), srovnání technologických vlastností a vývojových trendů. Optimalizace technologie obrábění s využitím těchto nástrojů pro vybranou aplikaci.

Cíle diplomové práce:

Specifikace moderních nástrojů ze slinutých karbidů pro různé technologie.

Technologická databáze řezivostních vlastností a doporučení pro vybrané aplikace.

Optimalizace řezných podmínek pro základní operace (hrubování, obrábění na čisto) pro danou aplikaci.

Seznam odborné literatury:

HUMÁR, A. Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění. 1. vyd. Brno: CCB spol. s r.o., 1995, 265s. ISBN 80-85825-10-4.

BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. Trenčín: TnUAD. 112s. ISBN 80-8075-013-0.

HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové spektrum. Speciální vydání včetně CD. 110s. Praha, 2004, ISSN 1212-2572.

AB SANDVIK, Sandviken, Sweden. Sandvik Hard Materials - Technical info - Understanding Cemented Carbide - Grain Size. [online]. Dostupné na World Wide Web:

http://www.hardmaterials.sandvik.com.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 10.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá moderními řeznými nástroji ze slinutých karbidů. Obsahuje rozbor slinutých karbidů určených pro výrobu těchto nástrojů, a to jak nepovlakovaných, tak i povlakovaných. Obsahuje také příklady moderních konstrukcí nástrojů pro soustružení, frézování a vrtání. Praktická část se zabývá vyhodnocením a porovnáním řezivosti dvou typů šroubovitých vrtáků.

Klíčová slova

Slinutý karbid, povlakování, PVD, CVD, řezný nástroj, řezivost šroubovitých vrtáků

ABSTRACT

This thesis is focused on cutting tools made of cemented carbides. It contains analysis of cemented carbides for uncoated and coated cutting tools. It contains examples of modern tools for turning, milling and drilling. Practical part of this thesis evaluates and compares cutting properties of two types of spiral drills.

Key words

Cemented carbide, coating, PVD, CVD, cutting tool, cutting property of spiral drills

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VOPAŘIL, Josef. *Moderní řezné nástroje ze slinutých karbidů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s., příloh. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Moderní řezné nástroje ze slinutých karbidů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 20. 5. 2009

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	8
1 NEPOVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY	9
1.1 Struktura a vlastnosti nepovlakovaných slinutých karbidů.....	12
2 POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY	15
2.1 Metody povlakování.....	21
2.1.1 Metoda CVD.....	21
2.1.1.1 Modifikované CVD metody	23
2.1.1.2 Zhodnocení metody CVD	24
2.1.2 Metoda PVD.....	24
2.1.2.1 Naprašování.....	25
2.1.2.2 Napařování	26
2.1.2.3 Iontová implantace.....	26
2.1.2.4 Technologie Tetrabond	27
2.1.2.5 Zhodnocení metody PVD	28
2.2 Struktura a vlastnosti povlaků.....	28
3 ŘEZNÉ NÁSTROJE PRO RŮZNÉ TECHNOLOGIE	31
3.1 Nástroje pro soustružení	31
3.1.1 Vyměnitelné břitové destičky	31
3.1.2 Způsoby upnutí břitových destiček	33
3.1.3 Nástroje pro vnější soustružení.....	34
3.1.4 Nástroje pro vnitřní soustružení	36
3.1.5 Nástroje pro zapichování a upichování	36
3.1.6 Nekonenční nástroje.....	38
3.2 Nástroje pro frézování	38
3.2.1 Čelní a válcové čelní frézy	39
3.2.2 Válcové a kotoučové frézy	40
3.2.3 Frézy pro výrobu závitů	40
3.3 Nástroje pro vrtání.....	41
4 ŘEZIVOSTNÍ VLASTNOSTI	51
5 ANALÝZA ŘEZIVOSTI ŠROUBOVITÝCH VRTÁKŮ	53
5.1 Vyhodnocení testu řezivosti.....	57
Závěr.....	65
Seznam použitých zdrojů.....	66
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	70
Seznam příloh.....	72

ÚVOD

Neustálý vývoj nových konstrukčních materiálů a moderních obráběcích strojů znamená také potřebu neustálého vývoje nových řezných nástrojů. Je známa široká paleta materiálů pro řezné nástroje počínaje nástrojovými oceli, přes slinuté karbidy, cermety, řeznou keramiku až po supertvrdé materiály jako jsou diamant či kubický nitrid boru. Vzhledem k jejich dlouholetému vývoji nelze v blízké budoucnosti předpokládat objevení nového materiálu pro řezné nástroje. Proto je v současné době vyvíjeno úsilí zdokonalení výrobních technologií a optimalizaci využití všech dosud známých materiálů.

Slinuté karbidy (dále SK) jsou díky svým výborným mechanickým, ale i dalším vlastnostem vhodné pro obrábění. Vyhovují moderním trendům obrábění, jako je například zvyšování řezné a posuvové rychlosti, stejně jako obrábění za sucha, či s minimem procesní kapaliny. SK jsou vyráběny práškovou metalurgií. Jejich struktura je tvořena pojivem a tvrdými částicemi - karbidy.

Povlakované SK mají na karbidovém podkladu povlak, který dále zlepšuje vlastnosti řezného nástroje. Proto většina výrobců dnes slinuté karbidy povlakuje. Povlaková vrstva bývá nejčastěji tvořena karbidy, nitridy a oxidy. Moderním směrem je kombinování více typů povlaků.

Díky svým vlastnostem a možnostem použití se můžeme s řeznými nástroji ze slinutých karbidů setkat u všech tří nejčastěji používaných způsobů třískového obrábění, kterými jsou soustružení, frézování a vrtání. Nástroje z SK lze dle konstrukce rozdělit na monolitní (nástroje menších rozměrů) a dnes častěji používané nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami. Ve vývoji vyměnitelných břitových destiček (dále VBD) se setkáváme s dvěma „revolucemi“. Tou první je přechod od nástrojů s destičkami pájenými do ocelových držáků k mechanickému upínání destiček (50. léta 20. století). Druhou revolucí je označován objev a rozvoj technologie povlakování.

1 NEPOVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

Dle normy ČSN ISO 513 jsou řezné materiály rozděleny do šesti skupin podle jejich použití pro obrábění různých materiálů a označeny písmeny (P, M, K, N, S, H) i barevně (viz tab. 1.1), přičemž SK lze převážně zařadit do skupin P, M, K. SK zařaditelné do skupin S, H, N stále prochází fází vývoje [11]. Nepovlakované SK s primárním obsahem WC jsou dle této normy označovány jako HW (zrnitost $\geq 1\mu\text{m}$) nebo HF (zrnitost $< 1\mu\text{m}$).

Tab. 1.1 Barevné označení skupin dle ČSN ISO 513

Skupiny	P	M	K	N	S	H
Barva označení	modrá	žlutá	červená	zelená	hnědá	šedá

Skupiny se dále dělí na podskupiny označené číselně (např.: P01, P05 atd.), kde zvyšující se číslo podskupiny znamená zvyšující se obsah pojícího kovu, houževnatost, pevnost v ohybu a klesající tvrdost a otěruvzdornost. Rostoucí číslo dále znamená změnu doporučených řezných podmínek a to konkrétně zvýšení rychlosti posuvu a průřezu odebírané třísky, naopak doporučená řezná rychlost klesá. Lze tedy říci, že podskupiny s nízkým číslem jsou vhodné pro dokončovací operace, kdežto podskupiny s vysokým číslem pro hrubování.

Pro výrobu nepovlakovaných i povlakovaných karbidů se používá jako pojiva kobaltu (Co). Základním karbidem je zde karbid wolframu (WC). Jako další se používají složky ve formě karbidu titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr_3C_2). Tyto karbidy jsou vzájemně rozpustné, a proto mohou tvořit slinutý karbid i bez kovového pojiva. Nepovlakové SK jsou pro své složení také někdy nazývány jednokarbidové (skupina K), dvojkarbidové (skupina P) a vícekarbidové (skupina M). Skupiny SK lze charakterizovat takto [2], [11], [16], [18]:

Skupina K

- Složení: WC (87÷92) % + Co (4÷12) %
- Použití: obrábění materiálů, které vytváří krátkou drobnou třísku (litiny, kalená ocel, neželezné slitiny a nekovové materiály).
- Řezné síly: obvykle relativně nízké, převládá abrazivní a adhezní opotřebení.
- SK této skupiny nejsou vhodné pro materiály tvořící dlouhou třísku, která zatěžuje tepelně čelo nástroje (větší plocha a doba styku)

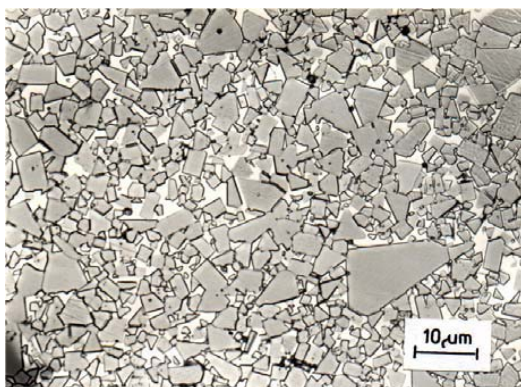
Skupina P

- Složení: WC (30÷82) % + TiC (8÷64) % + Co (5÷17) %
- Použití: obrábění materiálů tvořící dlouhou třísku (uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické nerezavějící oceli). To je způsobeno vyšší tvrdostí TiC za vyšších teplot než jaké dosahuje WC. Nevýhodou TiC je vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazi. Přísada TiC zaručuje vysokou odolnost proti difúzi za vysokých teplot, která je jednou z hlavních příčin vytváření výmolu na čele nástroje.
- Řezné síly: vysoké; značné opotřebení na čele nástroje.

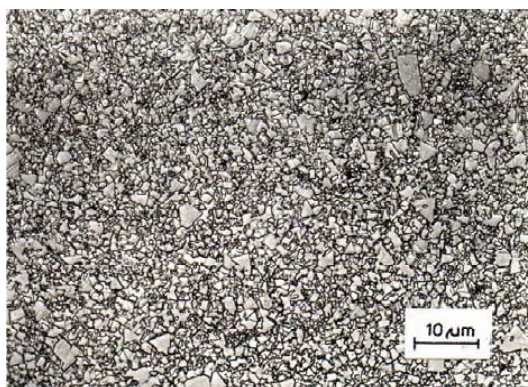
Skupina M

- Složení: WC (79÷84) % + TiC (5÷10) % + TaC.NbC (4÷7) % + Co (6÷15) %
- Použití: universální, pro obrábění materiálů, které tvoří střední a delší třísku (lité oceli, žáruvzdorné materiály, korozivzdorné austenitické a austeniticko-feritické oceli a tvárné litiny).
- Pro svoji relativně vysokou houževnatost se SK této skupiny používají pro těžké hrubovací práce a pro přerušované řezy.
- Řezné síly: střední až vysoké hodnoty; dochází k vydrolování ostří.

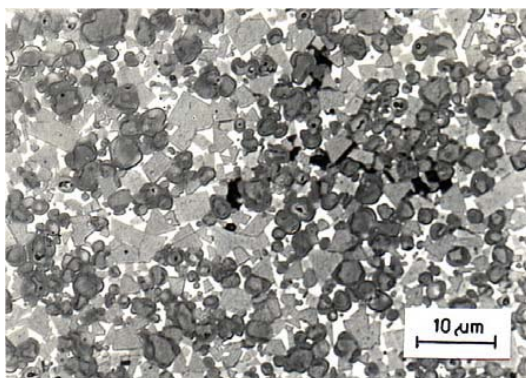
U skupin K a P se ve složení taktéž vyskytuje TaC.NbC, avšak nevytváří samostatnou strukturní složku. Jejím úkolem je zamezení růstu zrna hlavní karbidické fáze. [16]



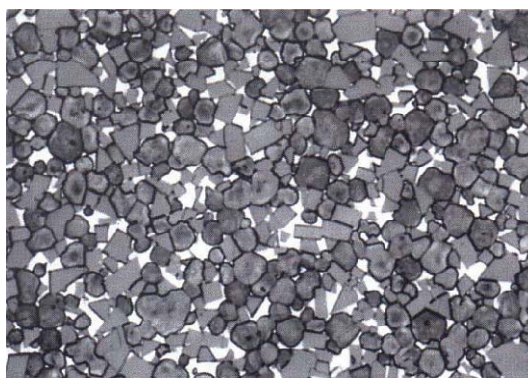
Obr. 1.1 Hrubozrnný SK skupiny K [18]



Obr. 1.2 Jemnozrnný SK skupiny K [18]



Obr. 1.3 SK skupiny P [18]



Obr. 1.4 SK skupiny M [18]

Skupina S

- Použití: speciální žárovevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe, Ti (např.: superslitiny typu Inconel, Hastelloy)

Skupina H

- Použití: oceli zušlechtěné na HRC 48 ÷ 60, tvrzené litiny HSh 55 ÷ 85

Skupina N

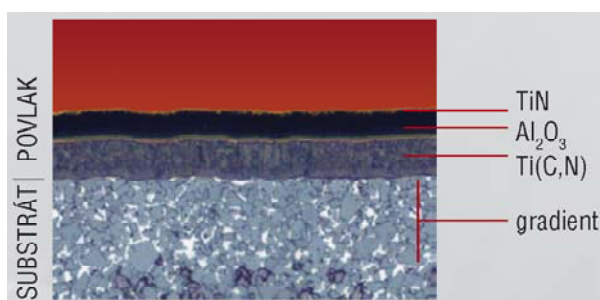
- Použití: neželezné kovy (slitiny Al a Cu), kompozitní materiály

Z hlediska použití nepovlakovaných SK pro základní operace je jen omezený počet druhů ze všech tří skupin využíván pro lehké a dokončovací operace charakteristické vysokou řeznou rychlostí v_c , nízkou posuvovou rychlostí v_f a šířkou záběru ostří a_p . Pro operace hrubování a těžké obrábění (nižší v_c , přerušovaný řez a větší a_p) jsou vzhledem ke svým vlastnostem (nižší tvrdost, ale vyšší houževnatost) používány skupiny nepovlakovaných SK s vyšším číselným označením. Tyto druhy SK jsou vhodné pro nástroje určené k frézování a vrtání. Skupiny s nižším číselným označením (nižší podíl pojivové fáze) mají vzhledem k větší odolnosti proti plastické deformaci při nepřerušovaném řezu lepší řezivost.

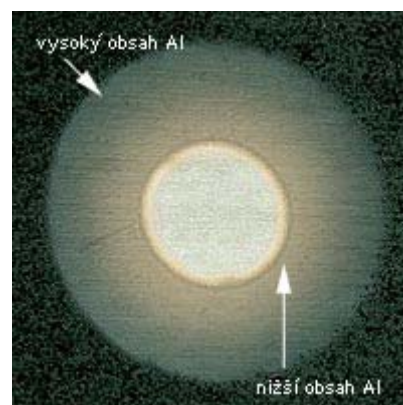
Funkčně gradientní slinuté karbidy

Jedná se o materiály, jejichž struktura se postupně mění od povrchu k jádru. V oblasti řezných nástrojů jsou využívány k výrobě podkladových slinutých karbidů pro povlakované břitové destičky. Řízením procesu slinování lze dosáhnout toho, že povrchová vrstva (tlustá několik desítek μm) bude obsahovat menší podíl tvrdých zrn kubických karbidů a více kovového pojiva. Směrem do jádra kubických karbidů ve struktuře postupně přibývá. Takový materiál má poté tvrdé jádro a houževnatý povrch, který brání šíření trhlin. [16], [17]. Na obrázku 1.5 je příklad materiálu s funkčně gradientním univerzálním středožrným substrátem opatřeným moderním středně silným speciálním MT-CVD povlakem.

Gradientním slinováním lze vytvářet i substráty s tvrdou vrstvou, s větším obsahem karbidické fáze na povrchu, a houževnatým jádrem, či dokonce takové břitové destičky, které mají různou mikrostrukturu na čele i hřbetě. Gradientní strukturu mohou mít i povlaky. [16]



Obr. 1.5 Materiál 9230 firmy Pramet [40]



Obr. 1.6 Marwin G - nanovrstevný gradientní systém (Ti,Al)N tvořený vrstvou s plynulou změnou stechiometrie [46]

1.1 Struktura a vlastnosti nepovlakovaných slinutých karbidů

Z hlediska použití pro řezné nástroje jsou důležité vlastnosti slinutých karbidů především tvrdost, pevnost (ohybová, tlaková), houževnatost a odolnost proti opotřebení. V praxi neexistuje způsob, jak zlepšit všechny tyto vlastnosti zároveň. Je tedy nutné zvolit způsob výroby, který bere ohled na více faktorů.

Nejvýznamněji ovlivňují vlastnosti řezných nástrojů z SK [2], [16]:

- složení SK
- velikost zrn a jejich rozložení (obvyklá velikost zrna je $0,5 \div 5 \mu\text{m}$)
- množství a velikost strukturních defektů (póry, segregovaný pojící kov, atd.)
- výrobní technologie a kvalita výroby

Faktorem ovlivňujícím prakticky všechny fyzikální i mechanické vlastnosti SK je obsah kobaltu, který plní funkci pojícího kovu. Jeho obsah ve slinutých karbidech pro řezné nástroje je nejčastěji v rozsahu $2 \div 13 \%$. Souhrn vlivů obsahu Co je uveden v tabulce 1.2. Jedná se o feromagnetický kov modrobílé barvy [16]. Kobalt se může vyskytovat ve dvou alotropických modifikacích. Při teplotách pod 400°C (přibližně) je jeho mřížka hexagonální, těsně uspořádaná – HCP (Hexagonal Closed Packed), při teplotách vyšších se jeho mřížka změní na kubickou plošně středěnou – FCC (Face Centered Cubic). Teplota alotropické přeměny závisí na čistotě prvku a na rychlosti změny teploty. I tak se však přesný údaj za stejných podmínek u různých autorů liší. Ve slinutých karbidech má kobalt, jako pojivo, kubickou mřížku, která nemůže být transformována žíháním. Toto chování bylo přisuzováno mechanickému omezení, pravděpodobněji je to však způsobeno stabilizací kubické mřížky rozpuštěným wolframem a uhlíkem. [52]

Tab. 1.2 Vliv obsahu kobaltu na vlastnosti slinutých karbidů [16]

Se vzrůstajícím % Co v materiálu	
Roste	Klesá
• Poissonovo číslo • pevnost v ohybu • pevnost v tahu • vrubová houževnatost • únavová pevnost (mírně) • koeficient délkové roztlačnosti • magnetická permeabilita	• měrná hmotnost • tvrdost • relativní odolnost vůči abrazi • modul pružnosti v tahu • modul pružnosti ve smyku • pevnost v tlaku • tepelná vodivost • intenzita elektromagnetického pole

Tvrdost SK je tedy nejvyšší při nízkém obsahu kobaltu. Totéž lze konstatovat i o velikosti zrna tvrdých částic. Obecně řečeno čím menší zrno, tím vyšší tvrdost materiálu. Toto chování lze popsat rovnicí Hall-Petchova typu [24]:

$$HV = 550 + \frac{23500}{\sqrt{d_{wc}}} \text{ [MPa]} \quad (1.1)$$

kde: **HV** ... tvrdost dle Vickerse [MPa]

d_{WC} ... velikost zrna WC [nm]

Tvrdost SK sice s rostoucí teplotou relativně rychle klesá (podobně jako u ostatních mechanických vlastností), avšak je stále vyšší než u rychlořezných ocelí. Tvrdost má také vliv, jak je patrné ze vztahu 1.2, na lomovou houževnatost slinutých karbidů. [16]

$$K_{IC} = \frac{0,203 \cdot HV \cdot \left(\frac{u}{2}\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{c}{u}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[MPa \cdot m^{\frac{1}{2}}\right] \quad (1.2)$$

kde: **HV** ... tvrdost dle Vickerse [MPa]

u ... délka úhlopříčky vtisku [m]

c ... celková délka centrální trhliny [m]

V případě pevnosti je pro funkci řezného nástroje důležitější pevnost v ohybu, než v tahu či tlaku. Zde je však vliv obsahu kobaltu a velikosti zrna tvrdých částic přesně opačný (vysoký obsah Co + hrubé zrno = vysoká pevnost v ohybu). Pevnost v ohybu se zvyšuje s rostoucím obsahem Co až do své určité maximální hodnoty (závisí na velikost zrn WC), kdy začne klesat. Dle tahových a ohybových zkoušek lze SK řadit mezi křehké materiály. Tomu však odporuje odolnost vůči porušení při vysoké plastické deformaci způsobené pouze normálovým tlakovým napětím. [16]

Na vysokou hodnotu měrné hmotnosti slinutých karbidů má největší vliv vysoká měrná hmotnost karbidu wolframu, a to hlavně díky vysoké hodnotě měrné hmotnosti wolframu: 19,25 g.cm⁻³ (WC: 15,7 g.cm⁻³, Co: 8,9 g.cm⁻³, TaC: 13,2 g.cm⁻³, TiC: 4,9 g.cm⁻³).

Tepelná vodivost SK s rostoucí teplotou klesá. Zároveň nižší hodnotu vykazují SK s jemnějším zrnem. Nižší tepelná vodivost λ příznivě ovlivňuje tepelné zatížení nástroje, avšak snižují odolnost proti teplotním šokům podle rovnice [16]:

$$\sigma_T = \frac{(1 - \nu) \cdot \lambda \cdot \sigma_b}{\alpha \cdot E} \quad (1.3)$$

kde: ν ... Poissonovo číslo

λ ... tepelná vodivost [W.m⁻¹.K⁻¹]

σ_b ... ohybová pevnost [MPa]

α ... součinitel délkové roztažnosti [K⁻¹]

E ... modul pružnosti v tahu [MPa]

Tyto vlastnosti společně tvoří základní předpoklady pro úspěšné použití SK pro řezné nástroje.

Základní vlastnosti SK typu WC-Co jsou shrnuty v tabulce 1.3. Hodnoty v ní uvedené se však mohou u současných konkrétních výrobců i výrazně lišit. Přesné hodnoty lze získat z jejich katalogů.

Tab. 1.3 Složení a vlastnosti slinutých karbidů podle rozdělení ISO [16]

Označení	Složení [%] 1) Ve většině případů obsahuje NbC (5÷40 %)			Měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	Tvrdość [HV]	Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Měrná tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Součinitel délkové roztlačnosti [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]
	WC	TiC+TaC ¹⁾	Co							
P01.2	30	64	6	7,2	1 800	750	3 500	---	---	---
P01.3	51	43	6	8,5	1 750	900	4 200	460	17	7,5
P01.4	62	33	5	10,1	1 750	1 000	4 100	480	17	7,5
P02	33	59	6	---	1 650	800	5 100	440	---	7,5
P03	32	56	12	---	1 500	1 000	5 250	430	---	8,0
P04	62	33	5	---	1 700	1 000	5 250	500	---	7,0
P05	77	18	5	12,2	1 700	1 100	4 300	---	---	6,0
P10	63	28	9	10,7	1 600	1 300	4 600	530	29	6,5
	55	36		---			5 200			
P15	71	20	9	---	1 500	1 400	5 100	530	---	6,5
P20	76	14	10	11,9	1 550	1 500	4 800	540	34	6,0
P25	71	20	9	12,4	1 450	1 750	4 800	550	42	6,0
P30	82	8	10	13,1	1 500	1 700	5 000	560	59	5,5
P40	75	12	13	12,7	1 400	1 900	4 900	550	59	5,5
P50	68	15	17	12,5	1 300	2 100	4 000	520	54	---
M10	84	10	6	13,1	1 750	1 350	5 000	580	50	5,5
M15	81	12	7	---	1 550	1 550	5 500	570	---	5,5
M20	82	10	8	13,4	1 550	1 600	5 000	570	63	5,5
M30	81	10	9	14,4	1 450	1 800	4 800	550	63	5,5
M40	79	6	15	13,6	1 300	2 100	4 400	540	67	6,0
K01	92	4	4	15,0	1 800	1 200	5 900	670	84	4,5
K03	92	4	4	---	1 800	1 200	6 200	630	---	5,0
K05	91	3	6	14,5	1 750	1 400	5 900	650	80	5,0
	92	2	6	---		1 350	6 000	630	---	
K10	92	2	6	14,8	1 600	1 500	5 700	630	80	5,0
K20	93	1	6	14,8	1 550	1 700	5 200	620	80	5,0
	92	2	6	---			5 500		---	
K30	90	1	9	14,4	1 450	1 900	4 700	580	71	5,3
	93	---	7	---	1 400	2 000	4 600	600	---	5,0
K40	87	1	12	14,2	1 300	2 100	4 500	570	67	5,5
	88	---	12	---		2 200		580	---	

2 POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

Vývoj povlakování znamenal revoluci v oblasti nástrojů ze slinutých karbidů. První povlakovanou břitovou destičku z SK pro obrábění vyrobila firma Sandvik Coromant v roce 1969 (materiál GC125, povlak TiC, tloušťka vrstvy $4 \div 5 \mu\text{m}$) [18]. Jako další se při povlakování začaly používat TiN, Ti(C,N) a Al_2O_3 . Povlaky jsou na karbidickém podkladu vytvářeny metodami PVD (Physical Vapour Deposition - fyzikální napařování) nebo CVD (Chemical Vapour Deposition - chemické napařování z plynné fáze), či některou z moderních metod z nich odvozených. Původně byly používány SK skupin P, K, M, dnes se již používají speciální podkladové SK. Povlaky se vyrábějí jako jednovrstvé či vícevrstvé a aplikují se zejména na vyměnitelné břitové destičky. Dle normy ČSN ISO 513 jsou povlakované slinuté karbidy (spolu s cermety) označeny písmeny HC.

Povlakování nástrojů používáme především z důvodu snížení tření, zabránění ulpívání třísek na čele nástroje a vzniku nárůstu. I díky tomu vzrůstá životnost nástroje. Povlak je tenká vrstva s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení, jelikož materiál povlaku neobsahuje žádné pojivo a oproti základnímu materiálu má o jeden (i více) řádů nižší zrnitost. Důležitou roli hraje také menší výskyt strukturních defektů (póry, dutiny). Povlak brání difuznímu mechanismu opotřebení nástroje. Díky všem těmto vlastnostem povlaků získáváme nástroje vhodné pro vysoké řezné a posuvové rychlosti, vysoký úběr třísky a přerušovaný řez. [18]

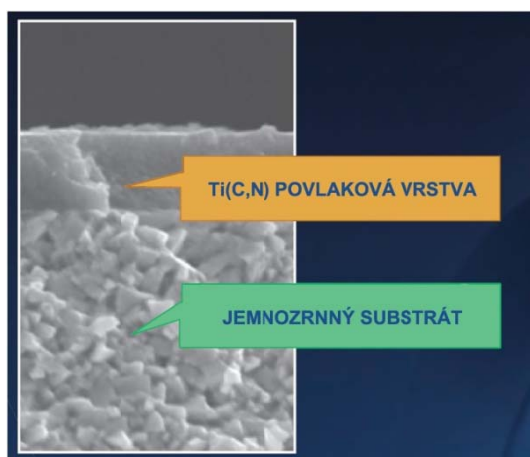
V odborné literatuře se obvykle uvádějí tyto vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů [16]:

1. generace:

Jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou asi $6 \mu\text{m}$ 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). Při obrábění takovými nástroji proto rychle docházelo k odlupování povlaku, což vedlo k znehodnocení nástroje.

2. generace:

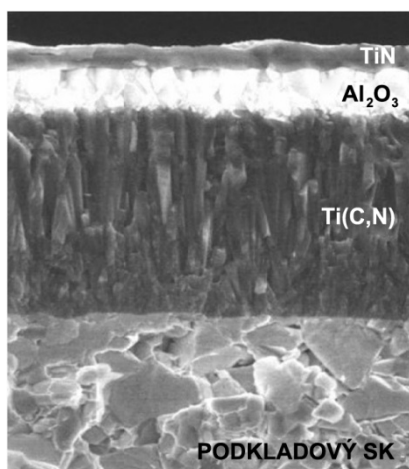
Jednovrstvý povlak (TiC, Ti(C,N), TiN) bez eta-karbidu na přechodu podklad - povlak. Zdokonalení technologie výroby umožnilo vytvořit vrstvy povlaků o větší tloušťce ($7 \div 10 \mu\text{m}$) bez nebezpečí jejich odlupování při funkci nástroje.



Obr. 2.1 Materiál PR10 firmy Kyocera (PVD povlak $Ti(C,N)$ na jemnozrnném substrátu) [30]

3. generace:

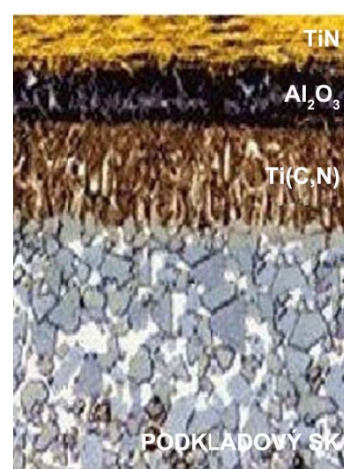
Vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které mají relativně nižší odolnost proti opotřebení a jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu (dobrá přilnavost k předchozí vrstvě vyplývá z procesu povlakování), ale vyžaduje se od nich zejména vysoká tvrdost, odolnost proti opotřebení a oxidaci za zvýšených teplot. Nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v tomto pořadí (od podkladu k povrchu): $TiC-Al_2O_3$, $TiC-TiN$, $TiC-Ti(C,N)-TiN$, $TiC-Al_2O_3-TiN$, $Ti(C,N)-Al_2O_3-TiN$.



Obr. 2.2 Povlakovaný slinutý karbid UE6020 firmy Mitsubishi [27]



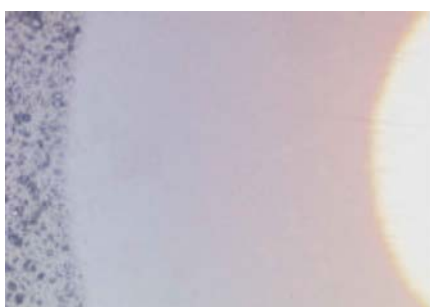
Obr. 2.3 Povlak firmy Kyocera [27]



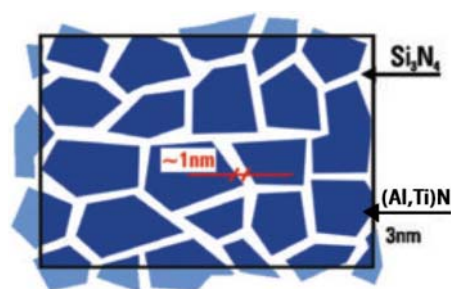
Obr. 2.4 Povlak firmy Sandvik-Coromant [27]

4. generace:

Speciální vícevrstvý povlak (může být složený i z deseti a více vrstev a mezivrstev). Přechody mezi jednotlivými vrstvami jsou více či méně výrazné. Z materiálového hlediska jsou vrstvy shodné s povlaky 3. generace. Do této skupiny lze též zařadit diamantové, nanokompozitní (2 i více vzájemně nerozpustných složek, minimálně jedna krystalická), gradientní (plynulá změna vlastností od základního materiálu k povrchu), supermřížkové (jednotná mřížka tvořená opakováním vrstvy, která nemusí být krystalická, s periodou menší než 1nm – difrakce při rentgenovém či elektronovém ozáření) [5] a tzv. inteligentní (např. na inteligentních nástrojích firmy Kyocera) povlaky. Taktéž lze do této kategorie zahrnout povlaky z kubického nitridu boru (KNB).



Obr. 2.5 Typická nanogradientní vrstva (Ti,Al)N s podílem Ti : Al u povrchu, blížícím se 20 : 80 [15]

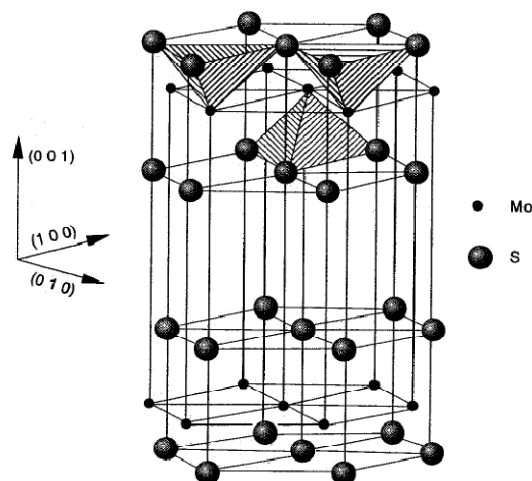


Obr. 2.6 Nanokompozitní vrstva – malé krystality o velikosti několika nanometrů jsou uloženy v amorfni matrici, přičemž obě fáze jsou nemísitelné [15]

V současné době jsou nejčastěji používané povlaky 3. a 4. generace, které se dočkaly velkého rozvoje na přelomu 80. a 90. let 20. století. Současně došlo také k většímu rozvoji PVD a PCVD metod povlakování. Ve prospěch těchto metod mluví výborné vlastnosti jimi vytvářených povlaků při přerušovaném řezání (frézování). Nastoleným trendem je nejen zdokonalování stávajících metod povlakování, ale také vývoj metod nových. To platí i o materiálech povlaků. Proto se dnes můžeme setkat s povlaky např.: $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$, (Al,Ti)N, B_4C , CrC, CrN, HfC, HfN, MgO, SiO_2 , TaC, TaN, Ta(C,N), TiC+TiB₂, (Ti-Cr)CN, (Ti,Al)N, (Ti,Al,Si)N, TiO_2 , Ti_2N , TiN/NbN, TiN/TaN, TiZrN, Y_2O_3 , ZrC, ZrN. Avšak ne všechny se již dočkaly praktického využití. Dalším významným krokem při zvyšování výkonu řezného procesu jsou tzv. lubrikační (samomazné) povlakové vrstvy (např.: MoS_2) vytvořené metodou PVD (obr. 2.7). Ty značnou měrou snižují tření (koeficient tření $\mu = 0,05 \div 0,15$) [17] mezi čelem nástroje a odcházející třískou, čímž snižují tepelné zatížení nástroje, které má vliv na trvanlivost řezného nástroje. Pozornost je v současnosti také věnována povlakům z polykrystalického diamantu. [51]



Obr. 2.7 Nanokompozitní povlak Lubrik SI s kluznou vrstvou firmy SHM [46]



Obr. 2.8 Krystalografická mřížka MoS_2 [28]

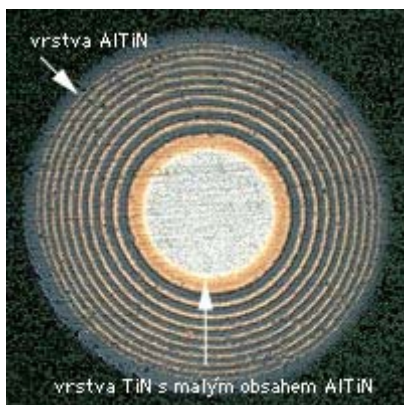
Tab. 2.1 Důležité stupně ve vývoji tvrdých povlaků [34]

Povlak	Materiál	Tvrdost [GPa]	Charakteristika
Jednovrstvý	TiN, TiC, Al_2O_3	21, 28, 21	CVD při teplotě kolem 1 000 °C na substrátech SK
	TiN, TiC	21, 28	PVD při teplotě ≤ 550 °C na ocelových substrátech
Multivrstvý	TiC/TiB ₂		Kolem 10^3 mezifázových hranic TiC/TiB ₂
Jednovrstvý	c-NB	50	Chemická rozpustnost boru v železe
	Diamant	90	Vysoká chemická aktivita k železu
	(Ti,Al)N		Odolnosti vůči oxidaci až do 800 °C
	DLC	65	Amorfní fáze
	CN _x	50 ÷ 60	Substechiometrická struktura ($x = 0,20 \div 0,35$)
Supermřížkový	TiN/VN, TiN/NbN, atd.	~50	Supermřížková perioda 5 ÷ 10 nm
Jednovrstvý	Nc-MN/ α -nitrid	~50	Nanokompozit, M = kov
	Nc-MN/M		
	Ti _{0,4} Al _{0,6} N	~32	Nanokompozit, odolnost vůči oxidaci až do 950 °C

Multivrstvé povlaky

Vyznačují se vysokou trvanlivostí, tudíž VBD s těmito povlaky lze použít pro velké úběry materiálu. V jejich struktuře se pravidelně střídají dvě "jednoduché" vrstvy s různými fyzikálními vlastnostmi a velmi malou tloušťkou (10 nm i méně). Díky tomuto střídání vrstev jsou fyzikální vlastnosti multivrstvého povlaku jiné než vlastnosti jednovrstvého povlaku o stejném průměrném složení. Výhodou těchto povlaků je jejich velmi malá drsnost povrchu, díky čemuž je nižší teplo vzniklé při tření mezi nástrojem a třískou. Proto si povlak déle udrží svoji tvrdost a odolnost vůči chemickému opotřebení.

Výhodou je také fakt, že každá hranice mezi jednotlivými vrstvami je překážkou proti šíření trhlin v povlaku. [17]



Obr. 2.9 Multivrstvý povlak
firmy SHM [46]



Obr. 2.10 Multivrstvý systém TiN/Ti(C,N)
firmy Galenite [27]

Diamantové povlaky

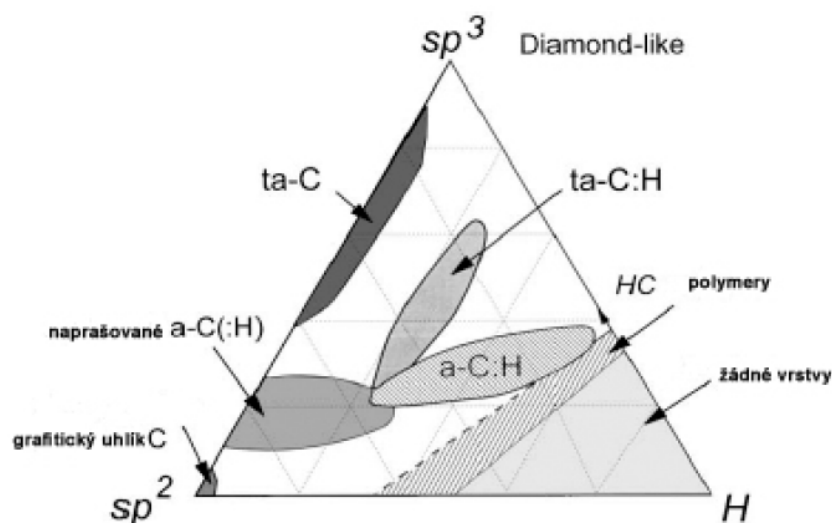
S řeznými nástroji využívajícími diamant se můžeme setkat ve dvou základních provedeních [16]:

- roubík ze syntetického diamantu připájený na VBD ze slinutého karbidu
- nástroje z různých materiálů (slinutý karbid, nitrid křemíku, karbid křemíku, atd.) s diamantovým povlakem (tloušťka < 50 μm).

Tyto diamantové povlaky lze dále rozdělit do dvou skupin:

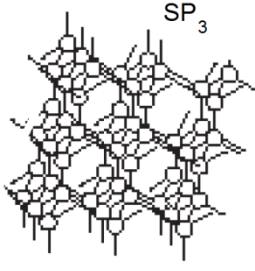
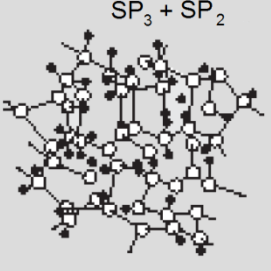
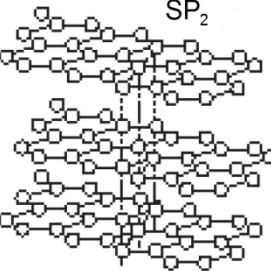
- diamantové povlaky tvořené shluky krystalů (zrnitost 1 ÷ 10 μm), které jsou identické s přírodním diamantem a syntetickým diamantem vyrobeným při vysokém tlaku [12]
- povlaky z materiálů DLC (Diamond-Like Carbon), a-C (amorfní uhlík), a-C:H (amorfní uhlohydrát, amorfní hydrogenovaný uhlík), HDLC (hydrogenovaný DLC), ta-C (tetrahedrální amorfní uhlík) [16]

Mezi společné vlastnosti obou typů těchto uhlíkových povlaků patří nízký koeficient tření, snížená tepelná vodivost a vysoká tvrdost. [48]



Obr. 2.11 Ternární fázový diagram vazeb u a-C:H [28]

Diamant má kubickou krystalovou mřížku s sp^3 kovalentní vazebnou strukturou, kdežto grafit mřížku hexagonální tvořenou sp^2 strukturou propojenou slabými Van der Waalsovými silami ve dvou rovinách. Změnou koncentrace vodíku a poměru sp^2/sp^3 vazeb mohou být připraveny měkké Polymer-Like Carbon vrstvy (PLC) nebo tvrdé amorfnní Diamond-Like Carbon vrstvy (DLC). Diamond-like carbon (DLC) vrstvy mají podobné mechanické, optické, elektrické a chemické vlastnosti jako přírodní diamant, ale nemají jednoznačnou strukturu. [47]

Diamant	DLC (Diamond-Like Carbon)	Grafit
SP_3 	$SP_3 + SP_2$ 	SP_2 

Obr. 2.12 Vazby v DLC vrstvách [47]

Vyměnitelné břitové destičky s diamantovými povlaky se využívají stále častěji než diamantový roubík, jelikož mají několik výhod. Mezi ně patří nižší výrobní cena, větší výběr tvarů destiček (např. předlisovaný utvařec třísky), větší počet břitů a také nejsou omezeny šířkou záběru ostří a_p . Jejich nevýhodou je nižší houževnatost. Nejsou taktéž schopny odolávat mechanickým rázům a nejsou tedy vhodné pro hrubování a přerušované řezy. [50]

Problémem je také nízká adheze diamantového povlaku k podkladovému slinutému karbidu způsobená rozdílnými koeficienty délkové roztažnosti, moduly pružnosti a atomovými a chemickými strukturami mezi diamantem a slinutým karbidem. Adhezi také snižuje tendence ke vzniku grafitu způsobená přítomností kobaltu v základním SK. Dle [32] jsou základní možnosti zlepšení adheze tyto:

- použití substrátu s nízkým obsahem Co
- odstranění Co z povrchu substrátu (pomocí kyselin H_2SO_4 , HCl a HNO_3 nebo jejich směsí)
- oduhličení povrchu substrátu před deponováním vrstvy pomocí směsi plynů $H_2 + 2\% O_2$ (obnažení zrn WC, zvětšení plochy styku povlaku se substrátem)
- zvýšení drsnosti povrchu před deponováním
- snížení teploty deponování
- vysoká rychlost ukládání diamantové vrstvy
- vytvoření mezivrstev na rozhraní substrát/povlak

Povlaky z kubického nitridu boru (KNB)

Kubický nitrid boru je charakteristický svojí vysokou tvrdostí, která přesahuje hodnotu 4 000 HV, nízkou chemickou reaktivitou, teplotní stabilitou až do hodnot 1 400 °K, vysokým elektrickým odporem ($10^7 \div 10^{10} \Omega \cdot cm$) a nízkou měrnou hmotností [16]. Deponování KNB povlaků s sebou přináší mnoho problémů. Lze však očekávat, že kvalitní KNB povlaky budou znamenat "převrat" v oblasti řezných nástrojů. I proto se s informacemi o těchto povlacích v literatuře setkáme jen zřídka. Většina výrobců je totiž chráněna před zneužitím konkurencí [17].

2.1 Metody povlakování

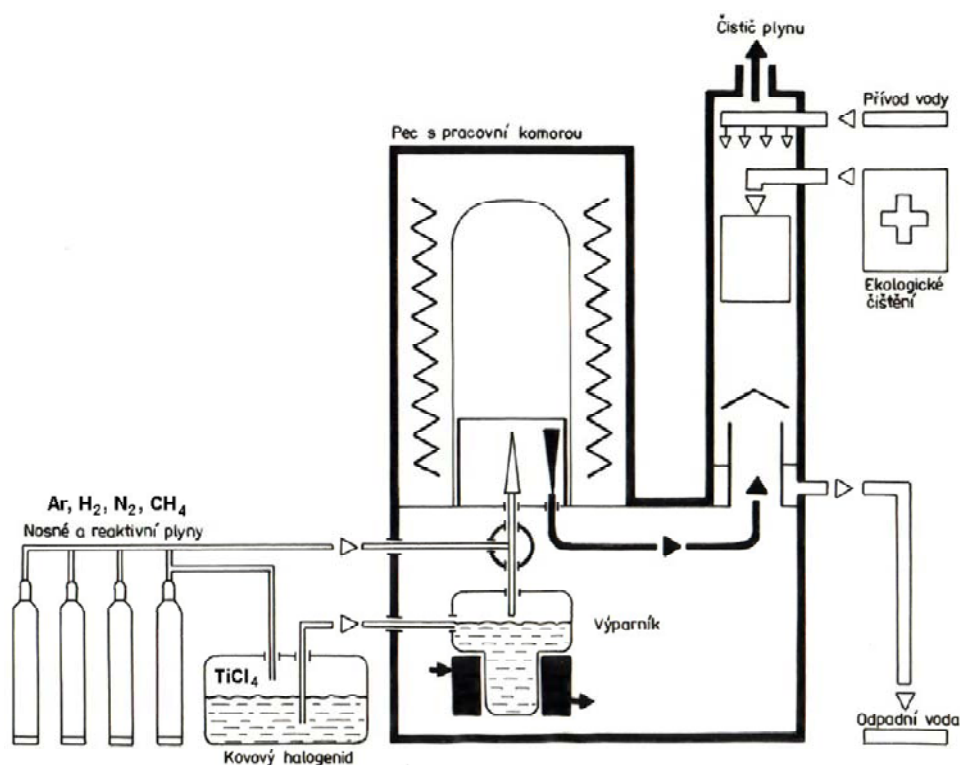
2.1.1 Metoda CVD

Jde o chemický proces (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování). Principem metody je reakce plynných chemických sloučenin za vysokých teplot. Tato reakce probíhá velmi blízko základního materiálu (SK), ve zde vytvořené plazmě. Produkty této reakce se ukládají na povrch podkladového slinutého karbidu a zastávají zde funkci katalyzátoru.

Základní požadavky [18]:

- výchozí plyn musí obsahovat stabilní, ale prchavou sloučeninu
- plyn musí obsahovat nekovový reaktivní plyn (např.: N_2 , NH_4 , CH_4)
- přívod energie (proces probíhá za teplot $1\ 000 \div 1\ 200^\circ C$) podle kterého můžeme metodu CVD rozdělit do čtyř variant [16]:

- tepelně indukovaná
- plazmaticky aktivovaná
- elektronově indukovaná (paprskem elektronů)
- fotonově indukovaná (např. laserem)



Obr. 2.13 Princip povlakovacího zařízení pro metodu CVD [18]

Tab. 2.2 Chemické reakce probíhající při CVD povlakování [5], [21]

Typ chemické reakce	Příklad	$T_{\text{reak}} [^{\circ}\text{C}]^*$
Teplotní rozklad (pyrolytická reakce)	$\text{TiI}_4 \rightarrow \text{Ti} + 2\text{I}_2$	1200
	$(\text{C}_8\text{H}_{10})_2\text{Cr} \rightarrow \text{Cr} + 2\text{C}_5\text{H}_{10} + 6\text{C}$	500
Redukce	$\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{Si} + 4\text{HCl}$	900 ÷ 1200
	$\text{WF}_6 + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{W} + 6\text{HF}$	550 ÷ 800
Oxidace	$\text{SiH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	350
	$\text{TiCl}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{TiO}_2 + 2\text{Cl}_2$	
Hydrolýza	$2\text{AlCl}_3 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} + 3\text{CO}$	800 ÷ 1150
Nitridace	$\text{TiCl}_4 + 0,5\text{N}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{TiN} + 4\text{HCl}$	1200
	$3\text{SiH}_4 + 2\text{N}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 10\text{H}_2$	800
Disproporční (nepoměrná) reakce	$3\text{GaCl} \leftrightarrow 2\text{Ga} + \text{GaCl}_3$	
	$\text{Si} + \text{SiI}_4 \leftrightarrow 2\text{SiI}_2$	
Syntéza	$\text{TiCl}_4 + 2\text{BCl}_3 + 5\text{H}_2 \rightarrow \text{TiB}_2 + 10\text{HCl}$	1100
	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3\text{AsH}_3 \rightarrow \text{GaAs} + 3\text{CH}_4$	

* při tepelně indukované CVD metodě

2.1.1.1 Modifikované CVD metody [5], [16], [50], [51]

Plazmaticky aktivovaná CVD metoda (označována jako PCVD, PACVD, PECVD)

Základní odlišnost je v pracovní teplotě, která se pohybuje okolo 600 °C (lze se setkat i s hodnotami 480÷560 °C), při nezměněném principu metody. Energie plynné atmosféry v pracovním prostoru se zvyšuje její ionizací a aktivací v plazmatickém výboji. Díky tomu lze snížit teplotu, při které se vytváří povlak.

Middle Temperature CVD metoda (MTCVD)

Teplota nanášení povlaku je 700 ÷ 850 °C, díky čemuž nedochází k poklesu houževnatosti podkladového SK. Místo standardně používaného metanu (CH₄) a čistého dusíku je zde jako vstupní sloučenina použit acetonitril (CH₃CN), případně vysoce toxický a hořlavý metylkyanid. Titan je získáván z chloridu titaničitého (TiCl₄). Výhodou je až třikrát rychlejší růst vrstvy Ti(C,N) a fakt, že zde nevzniká křehký eta-karbid mezi podkladem a povlakem. Takto vyrobené VBD jsou odolnější proti mechanickým rázům a jsou vhodné pro vysoké posuvové rychlosti. Taktéž nedochází k vylamování ostří při přerušovaném procesu řezání i při vyšších hodnotách (kladných) úhlu čela.

Metoda CVD se žhavicím vláknem (HFCVD – Hot Filament CVD)

Žhavicí vlákno je vyrobeno z wolframu. Jeho teplota v průběhu procesu dosahuje až 2 400 °C a je umístěno asi 80 mm od substrátu. Výhodou je urychlení nanášení povlaku oproti klasické CVD metodě (rychlost až o 1 řád vyšší). Používá se například pro deponování diamantových povlaků.

Laserem indukovaná CVD metoda (LICVD – Laser Induced CVD)

- pyrolytická: molekuly plynu na mezifázovém rozhraní (plyn – substrát) štěpeny ohřevem substrátu (paprskem laseru)
- fotolytická: molekuly plynu štěpeny fotochemickou reakcí

Metoda CVD s lavinovým plazmatickým výbojem (CACVD – Cascade Arc Plasma-assisted CVD)

Depozice indukovaná iontovým bombardem (IBICVD)

Nízkotlaká CVD metoda (LPCVD - Low Pressure CVD)

2.1.1.2 Zhodnocení metody CVD [16], [50]

Výhody:

- vysoká hustota povlaku
- vysoká teplotní stabilita povlaku
- vysoká homogenita povrchu
- výborná adheze
- rovnoměrná tloušťka povlaku u tvarově složitých nástrojů
- dobrá stechiometrie povlaku
- lze vytvářet relativně složité vrstvy
- lze povlakovat i nepřístupné dutiny a drážky (vysoké pracovní tlaky plynu: $1 \div 100$ kPa)
- vytváření tlustých vrstev je ekonomicky výhodné
- poměrně nízké pořizovací a provozní náklady

Nevýhody:

- možné tepelné ovlivnění jak povlaku, tak i nástroje (vysoké pracovní teploty procesu)
- dlouhá doba procesu ($8 \div 10$ hodin)
- nelze nanášet některé typy povlaků (např. kombinací různých typů kovů – (Ti,Al)N)
- tlustá vrstva povlaků brání vytvoření ostrých hran (zaoblují se)
- použití ekologicky nevyhovujících plyných směsí (toxické chloridy kovů)
- energeticky náročný proces
- tahové napětí ve vrstvě způsobené různými koeficienty délkové roztažnosti

2.1.2 Metoda PVD

Jde o fyzikální proces (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování). Principem metody je napařování čistého kovu (např. Ti) na podkladový materiál za nízkých teplot (pod $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16], některé zdroje uvádějí dokonce teploty pod $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18]). Depozice vrstvy probíhá jako napařování ve vakuu nebo jako naprašování ve výboji za nízkých tlaků ($0,1 \div 1$ Pa) [16]. Lze vytvářet pouze tenké vrstvy (cca. $5\text{ }\mu\text{m}$). Tato metoda původně sloužila pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, avšak v současnosti našla velké uplatnění v povlakování vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů. Tyto VBD jsou nejčastěji určeny pro frézování (přerušovaný řez). [18]

Nanášení vrstvy může probíhat třemi různými metodami:

- naprašování (sputtering)
- napařování (evaporation)
- iontová implantace (ion-plating)

2.1.2.1 Naprašování

Podstatou procesu je odprašování částic z povrchu kovu, připojeného na záporný pól napětí (-500 až -1 000 V). Tato katoda je také označována jako terč. Terč je bombardován kladnými ionty, vzniklými díky elektrickému výboji v plynné atmosféře komory. Tyto kationy mají vysokou kinetickou energii, a proto jsou schopny odprašovat z katody částice o určitém chemickém složení. Tyto částice se následně usazují na povrchu povlakovaných předmětů.

Rychlost eroze terče [16]:

$$R = 62,3 \cdot \frac{J \cdot S \cdot m_t}{\rho} [\text{Å} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2.1)$$

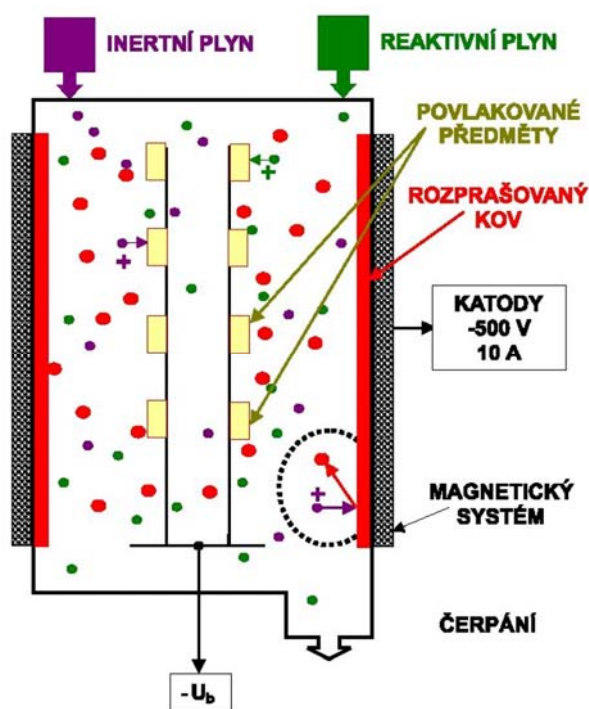
kde: **J** ... proudová hustota iontů [$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$]

S ... výtěžnost naprašování [atomy/iont]

m_t ... atomová hmotnost [g]

ρ ... měrná hmotnost materiálu terče [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]

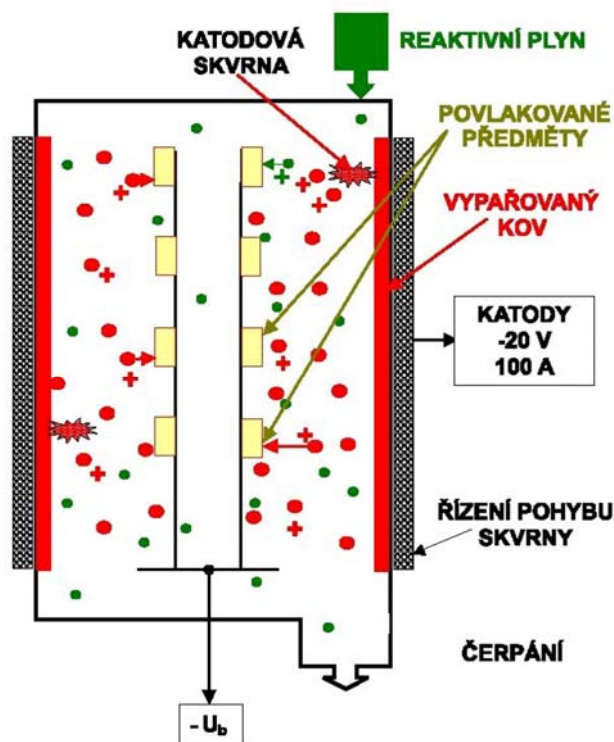
Chemické složení částic závisí mimo materiálu rozprašovaného kovu také na složení použité plynné atmosféry. Proces obvykle probíhá ve vakuu při tlaku nižším než 0,7 Pa. Výhoda metody spočívá v tom, že lze vytvořit povlak z těžkovatelného kovu bez nutnosti zahřívat terč. [16]



Obr. 2.14 Princip naprašování metodou PVD [18]

2.1.2.2 Napařování

Napařování se provádí ve vakuu za tlaku $10^{-3} \div 10^{-8}$ Pa [16]. Do pracovního prostoru napařovacího zařízení je přiváděn reaktivní a inertní plyn (např. argon a dusík) o tlaku $0,7 \div 26,3$ Pa [16]. Účelem plynné atmosféry je snížení střední volné dráhy atomů odpařených z terče (katody). Snížení střední volné dráhy způsobí zvýšení počtu srážek atomů a díky tomu vytvoření deponované vrstvy s rovnoměrnou tloušťkou. Metody napařování se rozdělují dle ohřevu terče, jelikož k procesu je nutná přeměna do kapalného stavu. Setkat se můžeme například s odporovým, indukčním a obloukovým ohřevem, ohřevem laserem či svazkem elektronů atd. V případě obloukového ohřevu dosahuje lokální teplota v místě katodové skvrny velmi vysoké teploty (až $15\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$), což způsobuje velmi vysokou rychlost částic odtržených od katody ($10\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$). [44]

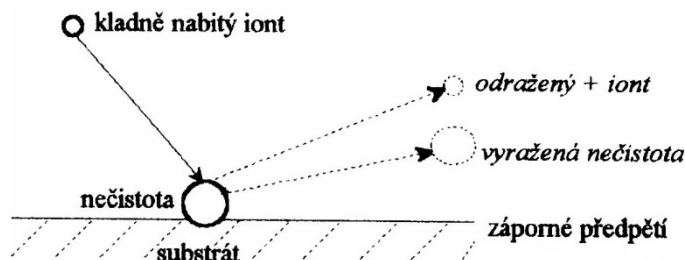


Obr. 2.15 Princip napařování metodou PVD [18]

2.1.2.3 Iontová implantace

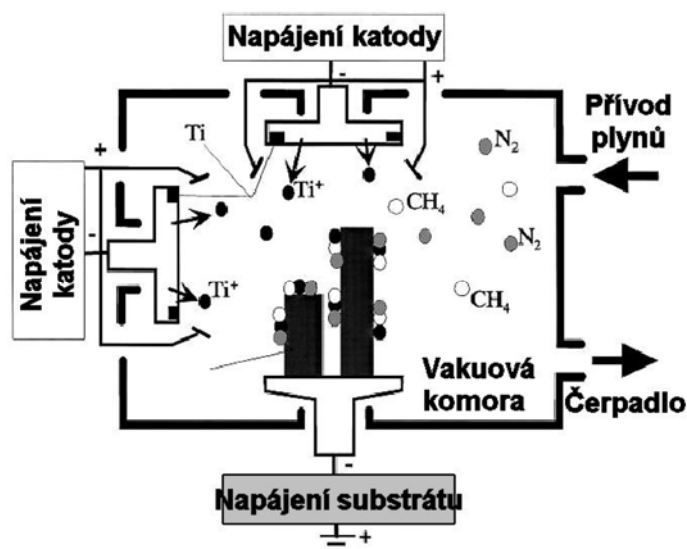
Jde v podstatě o kombinaci dvou předchozích metod. Částice materiálu povlaku můžeme získávat napařováním, napařováním, či z plynů a par. Katoda (terč) má záporný potenciál o hodnotě $50 \div 1\,000$ V [16]. Rozdíl potenciálů způsobuje ionizaci plynu i uvolněných částic deponovaného materiálu. Dopadající částice mimo vzniku vrstvy způsobují i tzv. iontové čištění (iontový bombard) povrchu a také uvolňují z vrstvy ty částice, které nejsou dostatečně vázány. Parametry tohoto iontového čištění jsou čas a velikost záporného předpětí na substrátu. Nevhodně zvolené parametry iontového čištění (příliš

dlouhý čas a vysoké napětí) mohou u SK substrátů způsobit odprášení pojiva (kobaltu) z povrchu. Hrozí proto porušení soudržnosti substrátu. [39]



Obr. 2.16 Princip iontového čištění [48]

Je tedy zřejmé, že dopad částic na povrch povlakované součásti má velký vliv na vlastnosti deponované vrstvy a také na teplotu procesu (teplota procesu je nižší než teplota potřebná k uskutečnění chemických reakcí).

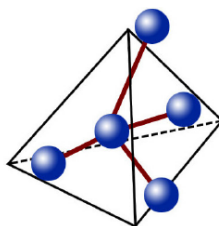


Obr. 2.17 Princip iontové implantace metodou PVD [18]

2.1.2.4 Technologie Tetrabond [22]

Tuto technologii vyvinula firma Ionbond. Jde o technologii odvozenou od obloukové PVD metody. Slouží k nanášení extrémně tvrdých (tvrdost $70 \div 90$ GPa), velmi hladkých DLC vrstev s tloušťkou v rozmezí $0,4 \div 1,5$ μm . Deponování probíhá za teplot nižších než 150 $^{\circ}\text{C}$ a proces trvá přibližně 3 hodiny. To je výrazně méně než při nanášení diamantových povlaků CVD metodou, kdy proces trvá obvykle okolo 8 hodin.

Název Tetrabond je odvozen od výrazu „Tetrahedral Amorphous Diamond“, tedy čtyřstěnný amorfni diamid. Tetrabond vrstvy mají ve struktuře $80 \div 90$ % sp^3 vazeb, což je typické pro přírodní diamant.



Obr. 2.18 Struktura krystalu čtyřstěnného amorfního diamantu [20]

Tyto povlaky jsou primárně určeny pro řezné nástroje určené k obrábění neželezných materiálů. Vykazují vysoký výkon při obrábění hliníku, grafitu, mědi a kompozitních materiálů. Taktéž jsou vhodné pro obrábění dřeva, plastu, epoxidových pryskyřic a určitých titanových slitin. Nástroje s těmito povlaky jsou vhodné k přepovlakování, jelikož firma Ionbond také vyvinula bezpečný způsob odstranění povlaku (strippingu).

2.1.2.5 Zhodnocení metody PVD [8], [16], [18], [50], [51]

Výhody:

- nezpůsobuje ovlivnění vlastností základního materiálu (nižší teplota procesu než u CVD povlakování)
- lze povlakovat i ostré hrany (poloměr zaoblení menší než 20 μm) a tvarově složitější utvařeče třísky

Nevýhody:

- nutná příprava povrchu před deponováním (odmašťování, čištění)
- směrový účinek procesu (nutný pohyb povlakovaných součástí)
- lze vytvářet pouze tenké vrstvy (do 5 μm)
- složitý vakuový systém
- úzký sortiment typů povlaků

2.2 Struktura a vlastnosti povlaků

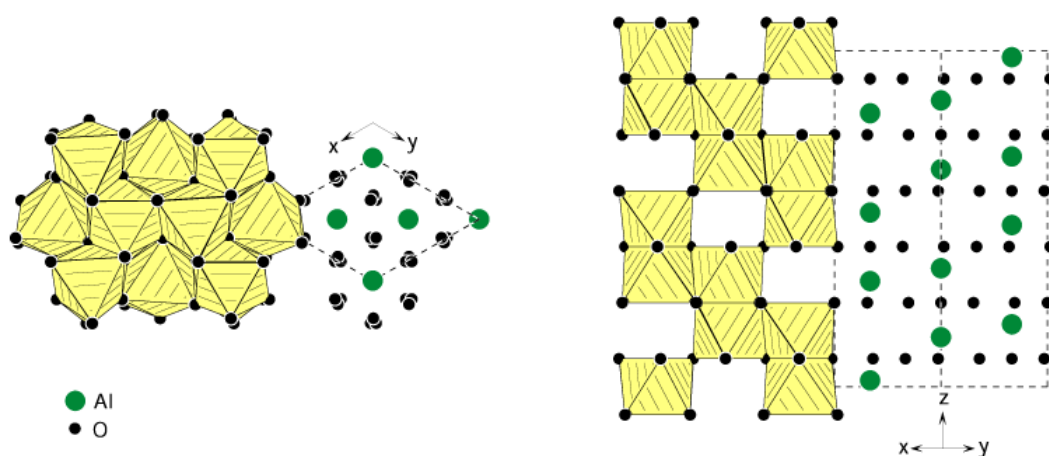
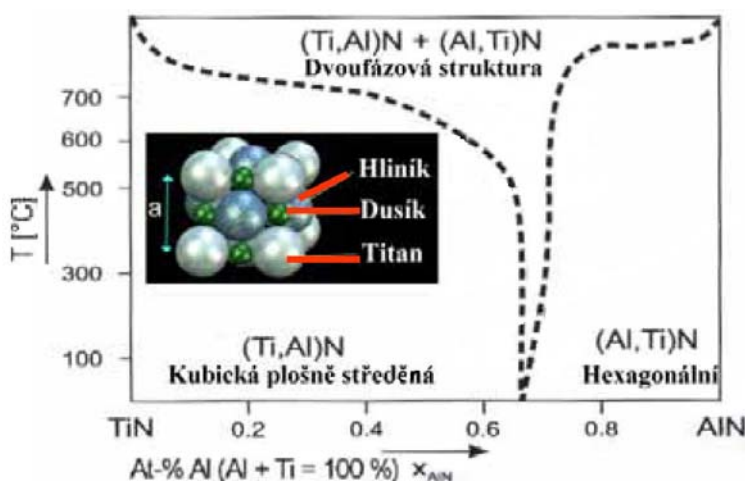
Požadované výsledné vlastnosti povlakové vrstvy můžeme měnit správnou volbou základních faktorů, kterými jsou [16]:

- druh povlaku
- tloušťka povlaku
- metoda povlakování

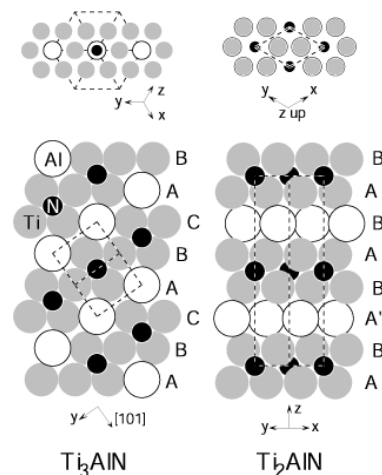
Tab. 2.2 Obecné porovnání vlastností základních povlakových materiálů [16]

Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Nejlepší	Al_2O_3	Al_2O_3	TiC	Al_2O_3
↑	(Ti,Al)N	(Ti,Al)N	(Ti,Al)N	(Ti,Al)N
	TiN	TiN	Ti(C,N)	TiN
	Ti(C,N)	Ti(C,N)	Al_2O_3	Ti(C,N)
Nejhorší	TiC	TiC	TiN	TiC

Z tabulky 2.2 je patrné, proč je povlak Al_2O_3 tak hojně využíván v mnoha typech moderních multivrstvých povlaků. Jeho mechanické a chemické vlastnosti předčí ostatní základní používané materiály.

Obr. 2.19 Krystalografická mřížka $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [7]

Obr. 2.20 Vliv množství hliníku na vznik hexagonální krystalografické mřížky [29]

Obr. 2.21 Krystalografická mřížka Ti_3AlN a Ti_2AlN [7]

Tloušťka jednotlivých vrstev v multivrstvých povlacích je velmi důležitá a obvykle odpovídá velikosti atomární mřížky (nanovrstva). Příkladem je multivrstvý povlak (Ti,Al)N, u kterého lze vytvořit vrstvy s kubickou mřížkou

s vysokým obsahem Al, který zaručuje tvrdost a otěruvzdornost. Vysoký obsah Al také zlepšuje odolnost proti oxidaci, ale může snižovat tvrdost. Hexagonální mřížka (Ti,Al)N je pro aplikace na řezné nástroje nevhodná. [37]

Obvyklá tloušťka deponované vrstvy se v praxi pohybuje v rozmezí $5 \div 10$ μm . Příliš velká silná vrstva je náchylnější k odlupování. Naopak při tenčí vrstvě je výsledný řezný výkon povlakovaného nástroje ovlivněný z větší míry vlastnostmi podkladového slinutého karbidu.

Deponovaný povlak může výrazně ovlivňovat průběh samotného procesu obrábění. Může snižovat namáhání soustavy stroj – nástroj – obrobek a také množství práce pro překonání plastických deformací. Snižuje koeficient tření a plní funkci bariéry proti difuznímu mechanismu opotřebení. Povlak naopak zvyšuje tvrdost řezného nástroje. [6], [50]

Tloušťka vrstvy má vliv i na ohybovou pevnost SK. U povlaků deponovaných metodou CVD s růstem tloušťky klesá. U PVD povlaků zůstává s rostoucí tloušťkou vrstvy ohybová pevnost téměř stejná. Ohybová pevnost povlakovaných SK je o $5 \div 20$ % menší než u nepovlakovaných.

Teploty deponování u CVD metody, které se pohybují nad hodnotou $1\,000$ $^{\circ}\text{C}$, způsobují vznik oduhličené eta-fáze na povrchu základního SK a také zvyšují výskyt trhlin v povlaku (způsobeno různými hodnotami koeficientu délkové roztažnosti. Podle použité metody deponování povlaku se také liší zbytková napětí v povlaku. U metody PVD jsou tlaková, kdežto u metody CVD tahová. PVD povlaky tedy mají vyšší pevnost v ohybu a odolnost vůči vydrolování. CVD povlaky mají vynikající adhezi a odolnost vůči opotřebení. [16]

3 ŘEZNÉ NÁSTROJE PRO RŮZNÉ TECHNOLOGIE

Volba vhodného nástroje pro obrábění je v současnosti velmi komplexním problémem. Nástroj vhodný pro určitou operaci musí být správnou kombinací geometrie bříty a řezného materiálu zohledňující tyto faktory [2]:

- druh operace obrábění
- materiál a tvar obrobku
- obráběcí stroj
- řezné podmínky
- požadovaná jakost povrchu
- stabilita technologie obrábění
- náklady na obrábění
- zda se jedná o hrubovací či dokončovací operaci
- zda se jedná o kontinuální nebo přerušovaný řez
- velikost přídavků na obrábění

3.1 Nástroje pro soustružení

Soustružnické nože lze z konstrukčního hlediska rozdělit na radiální, prizmatické, kotoučové a tangenciální. Podle konstrukčního provedení je rozdělujeme na:

- celistvé (celé z řezného materiálu, pro menší nástroje)
- s pájenými břitovými destičkami (řezná destička připájena tvrdou pájkou do tělesa nástroje)
- s vyměnitelnými břitovými destičkami (mechanicky upnutá řezná destička)

V současnosti se většina nástrojů určených pro technologii soustružení vyrábí v provedení s vyměnitelnou břítovou destičkou. Přechod od pájených k vyměnitelným destičkám je označován jako první revoluce v používání řezných destiček. U pájených destiček se vyskytuje zbytkové pnutí, což je mechanickým upínáním eliminováno. Použití VBD je výhodnější i z časového hlediska, jelikož výměna či otočení destičky je rychlejší než výměna celého nástroje a jeho seřízení. Nevýhodou může být větší rozměr mechanického upínače oproti připájené destičce. Vzhledem k neustálému vývoji je dnes známo mnoho různých tvarů VBD i způsobů jejich upnutí do držáku.

3.1.1 Vyměnitelné břítové destičky

Mimo slinutých karbidů se VBD vyrábějí z řezné keramiky, cermetů, polykrystalického kubického nitridu boru (PKNB) a polykrystalického diamantu. Velká většina vyráběných destiček je v současnosti vícebřitá. To znamená, že po otupení jednoho bříty se destička otočí do další polohy a obrábí se dalším

břitem. VBD mohou být jednostranné či oboustranné. Otočení i výměnu břítové destičky lze provádět rychle a snadno většinou bez nutnosti seřizování.

Při obrábění houževnatých materiálů vzniká dlouhá tříska a je nutné, nejen z hlediska bezpečnosti a plynulosti práce, ji utvářet (lámat). K tomu slouží utvařeče třísky, které jsou buď příložné, nebo jsou předlisovány, či přímo vybroušeny (u supertvrdých nástrojových materiálů) do řezné destičky.



Obr. 3.1 Vyměnitelné břítové destičky [18]

1 - SK, tvar S, oboustranné, předlisovaný utvařeč; 2 - SK, tvar W, oboustranná, předlisovaný utvařeč; 3 - SK, zapichovací, předlisovaný utvařeč; 4 - SK, závitové; 5 - SK, upichovací, předlisovaný utvařeč; 6 - monolitní PKNB, tvar R; 7 - roubík PD, tvar C, jednostranná; 8 - roubík PD, tvar T, jednostranná, utvařeč; 9 - roubíky PD, tvar S, oboustranná; 10 - monolitní PKNB, tvar S, jednostranná, vybroušený utvařeč

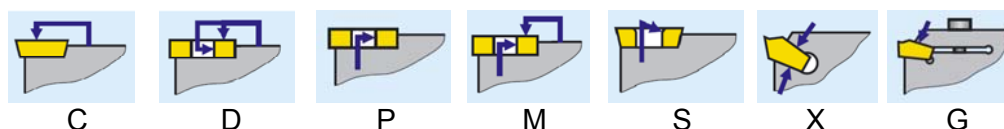
Břítové destičky jsou v nožovém držáku uloženy takovým způsobem, že zatěžující řezné odpory směřují do stěn, o něž se opírají, a nedochází k zatěžování upínacího mechanismu. Z důvodu zvýšení tuhosti a odolnosti proti otlaku mohou být VBD podkládány destičkou o stejném základním tvaru, jako má řezná destička. Tato podložka taktéž chrání spodní ostří, které není v záběru, před vylamováním a vydrolováním, jelikož nedochází k jeho kontaktu s třískou.



Obr. 3.2 Nástroj CoroThread 266 firmy Sandvik s břítovou destičkou a podložkou opatřenou vodící lištou [1]

3.1.2 Způsoby upnutí břitových destiček

Základní typy upnutí jsou popsány ve standardech ISO a rozděleny do skupin označených písmeny. Výrobci však v hojné míře využívají své vlastní konstrukční řešení. Norma ISO uvádí 7 různých typů upnutí podle způsobu vyvození a směru působení upínací síly (viz obr. 3.3).



Obr. 3.3 Způsoby upínání vyměnitelných břitových destiček

Systém ISO C

- upínání destiček s pozitivní i negativní geometrií, bez otvoru, s utvařečem i bez něj
- destička je do držáku přitlačována upínkou, síla je vyvozena dotahováním šroubu
- lze vložit příložný utvařeč třísky
- pro vnější i vnitřní soustružení
- v současné době již není příliš používán (např. při vnitřním soustružení nahrazován systémem S)

Systém ISO P

- upínání destiček s válcovým otvorem a negativní geometrií s utvařečem i bez něj
- destička je do držáku dotlačována úhlovou pákou pomocí dotahování šroubu
- velký upínací zdvih a rychlá výměna destičky při přesném a spolehlivém upnutí
- nejčastější použití pro vnější soustružení (hrubování i dokončování)

Systém ISO M

- upínání destiček stejného typu jako u systému P
- destička je nasazena na pevném čepu, k němuž je dotlačována upínkou, která současně dotlačuje destičku do držáku shora
- vhodné pro použití při zvýšeném dynamickém namáhání
- pro vnější soustružení

Systém ISO S

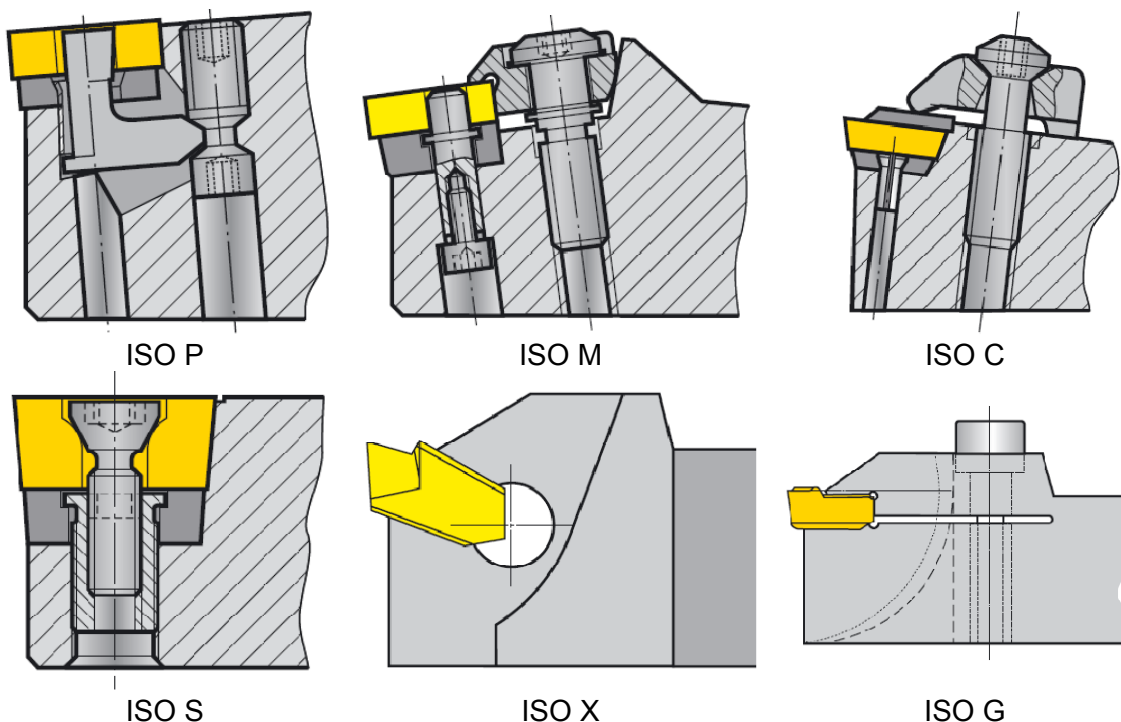
- upínání destiček s pozitivní geometrií
- destička upnuta pomocí speciálního šroubu se zapuštěnou hlavou za kuželový otvor v destičce
- rozměrově malý, avšak velmi bezpečný systém, který netvoří překážku v odchodu třísky

Systém ISO X

- označuje speciální způsoby upnutí (odlišné podle výrobce)
- firma Pramet takto označuje upnutí destičky řeznou silou do samosvorného lůžka
- pro nástroje k upichování a zapichování

Systém ISO G

- vhodný pro nože na soustružení zápichů a kopírovací soustružení
- destička dotlačována do držáku shora upínkou



Obr. 3.4 Systémy upínání vyměnitelných břitových destiček [43]

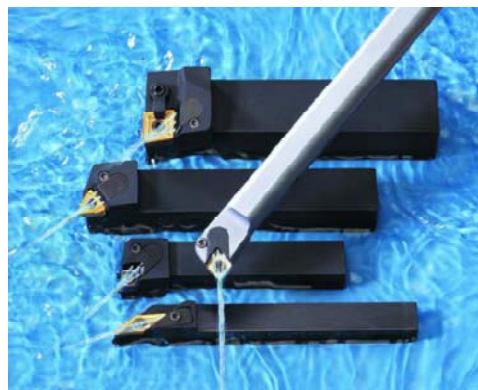
3.1.3 Nástroje pro vnější soustružení

Příkladem nástroje pro hrubovací operace je systém HELITURN firmy Iscar (obr. 3.5). Tento systém je vhodný pro vysoce výkonné soustružení, kdy je třeba rychle odebrat větší množství materiálu. Vyměnitelné břitové destičky jsou dvoustranné a mají čtyři břity. Jejich úzká čelní plocha je zakřivena a ostří má speciální šroubovitý tvar. Destička je do nožového držáku upnuta tangenciálně, což zaručuje velkou stabilitu i při velkém mechanickém zatížení nástroje. Systém je také vybaven podložkou odpovídajícího tvaru. Výrobce uvádí, že s tímto systémem lze dosáhnout hloubky záběru až 15 mm. [23]



Obr. 3.5 Systém HELITURN TG firmy Iscar [23]

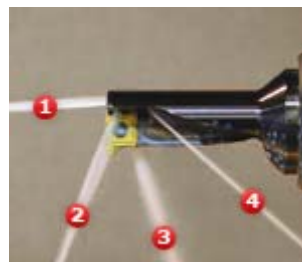
Firma Böhlerit vyrábí držáky Point-Blank vhodné pro standardní vyměnitelné břitové destičky, které jsou používány na běžných radiálních soustružnických nožích. Jsou vhodné jak pro hrubování, tak i dokončovací obrábění. Tento patentovaný držák přivádí řeznou kapalinu plochou tryskou, jejíž ústí je nad destičkou, přímo na hlavní ostří VBD. To způsobuje lepší utváření třísky, zvyšuje trvanlivost břitové destičky a zlepšuje výslednou jakost povrchu obrobené plochy. Pro správnou činnost stačí běžné čerpadlo. Doporučená hodnota průtoku kapaliny je $36 \div 45$ litrů za minutu a tlaku 7 MPa. [31]



Obr. 3.6 Radiální nůž Point-Blank firmy Böhlerit [31]

3.1.4 Nástroje pro vnitřní soustružení

Systém ProfileMaster firmy Ceratizit je příkladem multifunkčního nástroje, jímž lze mimo podélného a čelního soustružení vnitřních i vnějších ploch také vrtat i do plného materiálu otvory s plochým dnem, vyvrtávat, srážet hrany, zapichovat na vnitřních i vnějších válcových a čelních plochách i upichovat (viz obr. 3.7). Tento systém díky svému komplexnímu použití zkracuje časy potřebné pro výměnu nástroje a lze s ním dosáhnout výborné kvality povrchu. [6]



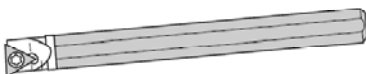
Obr. 3.7 Systém ProfileMaster firmy Ceratizit s vícenásobným přívodem řezné kapaliny a možnosti jeho využití [6]

Firma Mitsubishi vyrábí systém pro vnitřní soustružení s označením Micro-Dex. Tento systém je charakteristický svými velmi malými rozměry. Pro snadné nastavení vyložení nástroje mají na svém těle laserem vyznačenou stupnici. Tento systém používá jednak břitové destičky ze slinutého karbidu (označení GP15TF), tak i cermetu (označení NX2525). [33]

SCLC type



STUC type



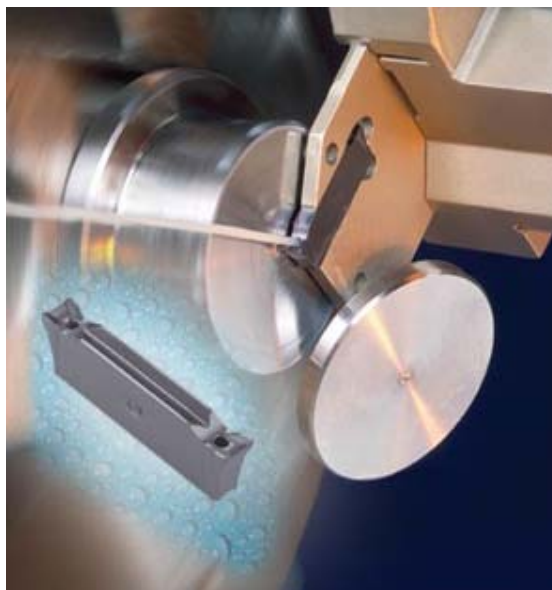
SWUB type



Obr. 3.8 Systém Micro-Dex firmy Mitsubishi [33]

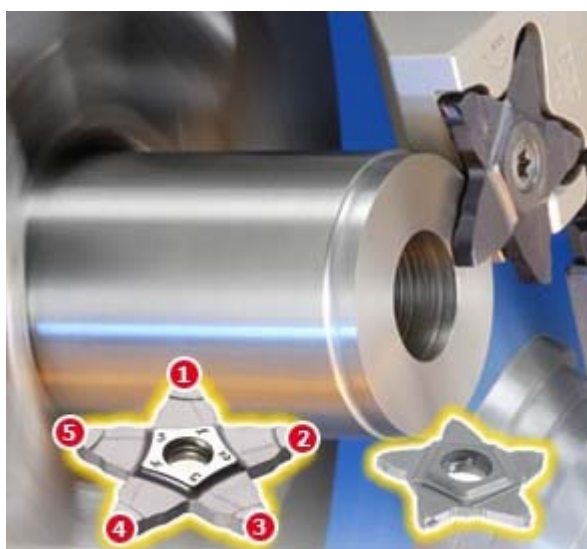
3.1.5 Nástroje pro zapichování a upichování

Systém JET-CUT s břitovými destičkami DOGRIP firmy Iscar (obr. 3.9) využívá přívod řezné kapaliny otvorem v destičce přímo k řezné hraně. Díky tomu zmenšuje (nebo dokonce úplně odstraňuje) adhezi obráběného materiálu a tvorbu nárůstku na břitu. Tříska nemůže bránit přístupu kapaliny k břitu, takže i chladicí účinek je vyšší. Při dostatečném množství přiváděné řezné kapaliny je nižší také opotřebení a vymílání břitu. Oboustranné břitové destičky DOGRIP jsou konstruovány pro zapichování a upichování vysokoteplotních slitin a nerez ocelí. [23]



Obr. 3.9 Systém JET-CUT s břitovými destičkami DOGRIP firmy Iscar [23]

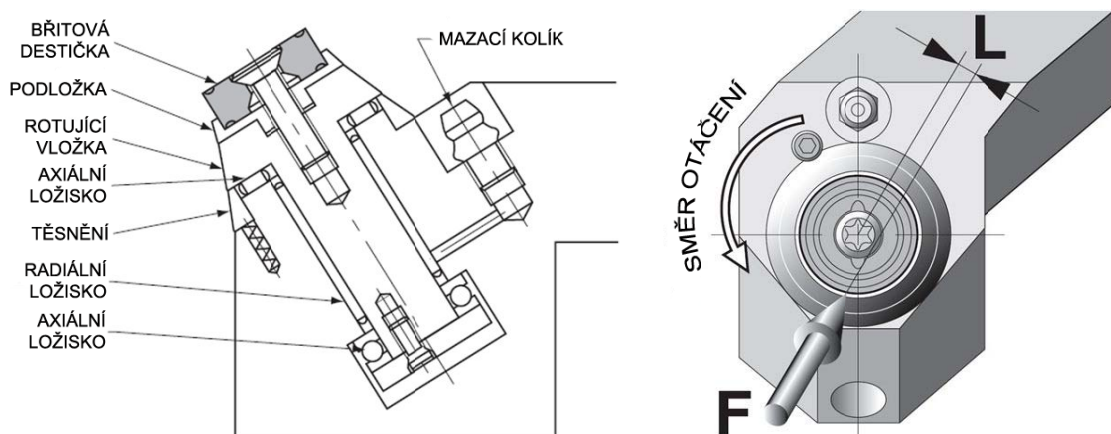
Stejná firma vyrábí systém PentaCut pro zapichování, upichování, podélné soustružení vybrání a srážení hran. Pětibřítá destička Penta 34 je vybavena C utvařečem, který formuje třísku takovým způsobem, aby nepřišla do kontaktu s bočními plochami zápichu nebo vybrání. Tato břitová destička zaručuje vysokou kvalitu povrchu nejen na bočních plochách, ale i na dně zápichu či vybrání. Doporučená hodnota posuvu pro destičku Penta 34 leží v rozmezí $0,05 \div 0,25$ milimetru na otáčku. Tangenciální upnutí destičky šroubem do držáku s krátkým vyložení zajišťuje vysokou stabilitu systému. [23]



Obr. 3.10 Systém PentaCut firmy Iscar [23]

3.1.6 Nekonvenční nástroje

Firma Mitsubishi vyrábí originální nástroj Rotary Holder s kruhovou břitovou destičkou, která se otáčí. Otáčení destičky zajišťuje krouticí moment vyvolaný silou řezného odporu (F) působící excentricky ve vzdálenosti L od osy upnuté destičky (viz obr. 3.11). Rychlost otáčení destičky je v porovnání s rychlostí obrobku třetinová až čtvrtinová. Místo na ostří, kterým břitová destička řeže, se neustále mění, a proto je nižší její opotřebení a tepelné zatížení. To tedy znamená, že trvanlivost této břitové destičky je vyšší, než kruhové destičky, která se musí otáčet manuálně. [33]



Obr. 3.11 Soustružnický nástroj Rotary Holder firmy Mitsubishi [33]

3.2 Nástroje pro frézování

Frézy jsou rozměrné vícebřité nástroje tvarově složitější než soustružnické nože. Jejich výroba je tedy náročnější a nákladnější. Při konstrukci frézovacího nástroje je nutné brát větší ohled na mechaniku tvorby třísky, tření třísky po čele břitu, rozdílnost sousledného a nesousledného frézování a dalších faktorů.

Vzhledem k širokému využití frézování ve výrobě existuje mnoho různých typů fréz, které lze rozdělovat do příslušných skupin podle nejrůznějších faktorů. Stejně jako u nástrojů pro soustružení se podle konstrukce rozdělují na celistvé a s břitovými destičkami. Lze také používat nástroj s vloženými soustružnickými noži. Podle toho se také liší materiál nástroje. Nástrojová či rychlořezná ocel a slinuté karbidy pro celistvé nástroje a materiály jako slinuté karbidy, řezná keramika a další tvrdé materiály pro břitové destičky. Podle umístění zubů se frézy rozdělují na válcové, čelní a válcové čelní. Dalšími hledisky jsou geometrický tvar funkční části (válcové, kotoučové, úhlové, drážkovací, atd.), způsob upnutí (nástrčné a stopkové) či směr (přímé, ve šroubovici) a počet zubů (jemnozubé, polohrubozubé, hrubozubé).

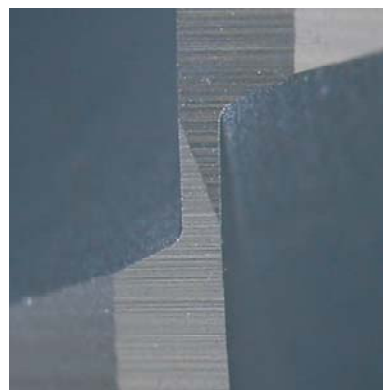
3.2.1 Čelní a válcové čelní frézy

Quadworx je název nových frézovacích nástrojů pro vysokoposuvové obrábění (HFC) firmy Pokolm. Vyrábí se v provedení šroubovacím, nástrčném, nebo s patentovaným systémem upínání DuoPlug. Vyměnitelné břitové destičky se čtyřmi řeznými hranami vyráběné z materiálů HSC05, P40, P25 a K10 s novým povlakem PVST jsou díky své makro i mikrogeometrii vhodné pro 2-, 2,5- a 3osé frézování. Tyto nástroje mají při obrábění rovnoměrný a klidný chod a na nástroj a vřeteno působí jen malé radiální síly. Jsou vhodné pro hrubování ocelí, litin a kalených ocelí. Doporučené pracovní podmínky jsou: $v_c = 100 \div 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, a_p až 1,2 mm, f_z až 2,2 mm. [36], [41]



Obr. 3.12 Nástroje Quadworx firmy Pokolm [36]

Kulové frézy HX-S firmy Fraisa pro výkonné a přesné frézování 3D tvarů jsou příkladem monolitního nástroje ze slinutého karbidu. Vyrábí se u jemnozrnného SK s 8 % kobaltu o tvrdosti 2 000 HV. Tělo je bez vrubů či odlehčení z důvodu vysoké tuhosti nástroje. Ostří nástroje je negativní s odchylkou profilu od ideálního tvaru kulové plochy maximálně 3 μm . Drsnost povrchu výbrusu je také oproti konkurenčním nástrojům nižší a dosahuje hodnoty R_a 0,05 μm . Tyto nástroje se používají při hrubování i dokončování tvarů v kalených ocelích (tvrdost maximálně 70 HRC). [42]



Obr. 3.13 Kulová fréza HX-S firmy Fraisa s směrem výbrusu kolmým k ostří [42]

3.2.2 Válcové a kotoučové frézy

Nástroje firmy Iscar s označením Tang-slot jsou díky své konstrukci vhodné pro drážkování, upichování a prořezávání. Vyrábí se ve dvou provedeních – diskové (SDN – LN12) a přírubové (FDN – LN12). V obou případech jsou oboustranné. U obou typů se také používají stejné spirálovité VBD s pozitivním utvařečem. Tangenciální upnutí v tělese je provedeno takovým způsobem, aby odvod třísky směřoval do středu drážky. Díky tomu je povrch drážky chráněn před poškozením třískou a taktéž dochází ke snížení řezných sil o 15 ÷ 25 %. Frézy Tang-Slot jsou vhodné pro výrobu velmi přesných drážek. Jednou z modifikací tohoto systému je například prořezávací fréza Mini-Tangslot s tělesem ve tvaru písmene T. [25], [26]



Obr. 3.14 Provedení nástroje Tang-Slot diskového typu SDN – LN12 a destičky LNET 12 [26]



Obr. 3.15 Přírubová fréza FDN ø 160 mm s kazetami s upevněnou destičkou LNET 12 [26]



Obr. 3.16 Prořezávací tangenciální fréza Mini-Tangslot [25]

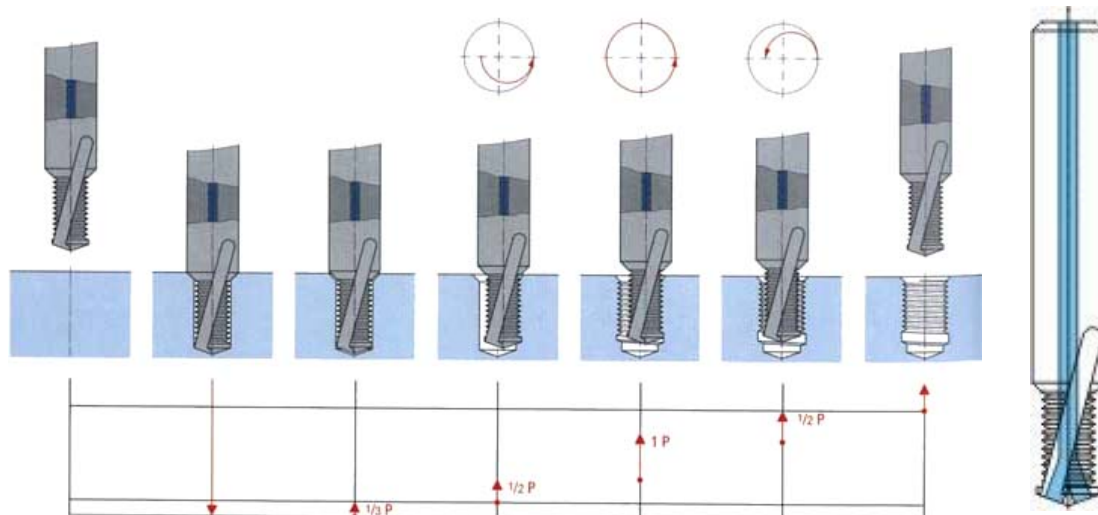
3.2.3 Frézy pro výrobu závitů

Firma Emuge-Franken vyrábí monolitní nástroje pro komplexní výrobu vnitřních závitů. Tzn., že jedním nástrojem lze vyvrtat otvor, srazit hranu a vytvořit závit. Označení těchto nástrojů je BGF (viz obr. 3.17) a vyrábí se jako dvoubřité, či tříbřité (pro vyšší výkon a klidnější chod při navrtávání). Jsou vhodné pro obrábění materiálů s krátkou a drobnou třískou (např.: šedá litina, hliník, umělohmotné materiály). [9]

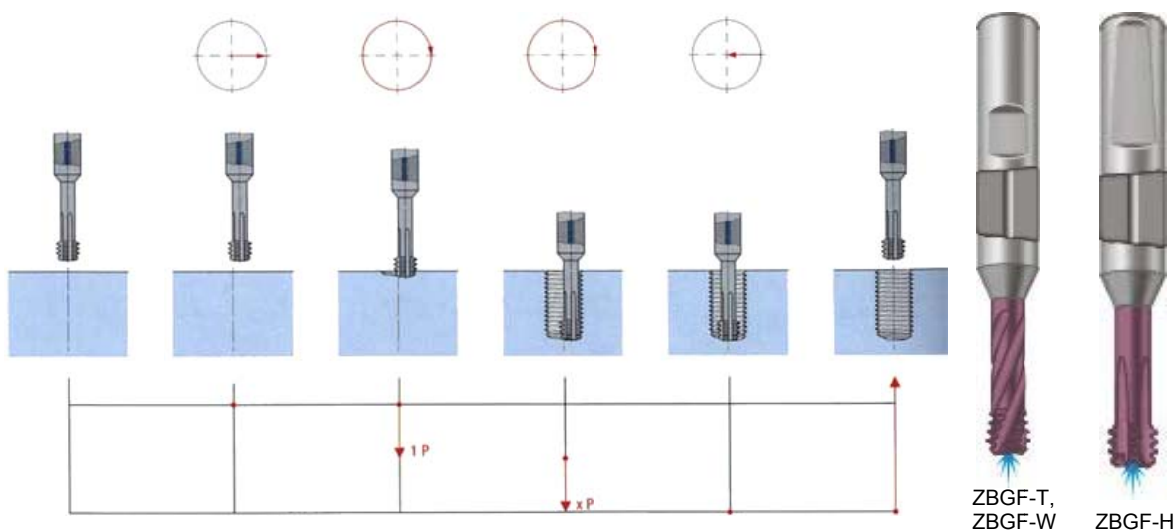
Nástroj ZBGF (obr. 3.18) od stejné firmy je taktéž monolitní fréza pro výrobu vnitřního závitu. Od výše zmíněného nástroje se liší strategií výroby. Vytváří závit kruhovou interpolací do plného materiálu. V provedení ZBGF-H s povlakem (Ti,Al)N E-extreme se používá pro obrábění kalených materiálů

(max. 62 HRC), provedení ZBGF-W s povlakem (Ti,Al)N Futura pro Al a jeho slitiny a legované oceli (max. $R_m = 1\,100\text{ MPa}$), provedení ZBGF-T s povlakem Ti(C,N) pro hliník a šedou litinu. [9]

Všechny tyto typy nástrojů firmy Emuge-Franken jsou chráněny patentem.



Obr. 3.17 Postup výroby vnitřního závitu nástrojem BGF firmy Emuge-Franken [9]



Obr. 3.18 Postup výroby vnitřního závitu nástrojem ZBGF firmy Emuge-Franken [9]

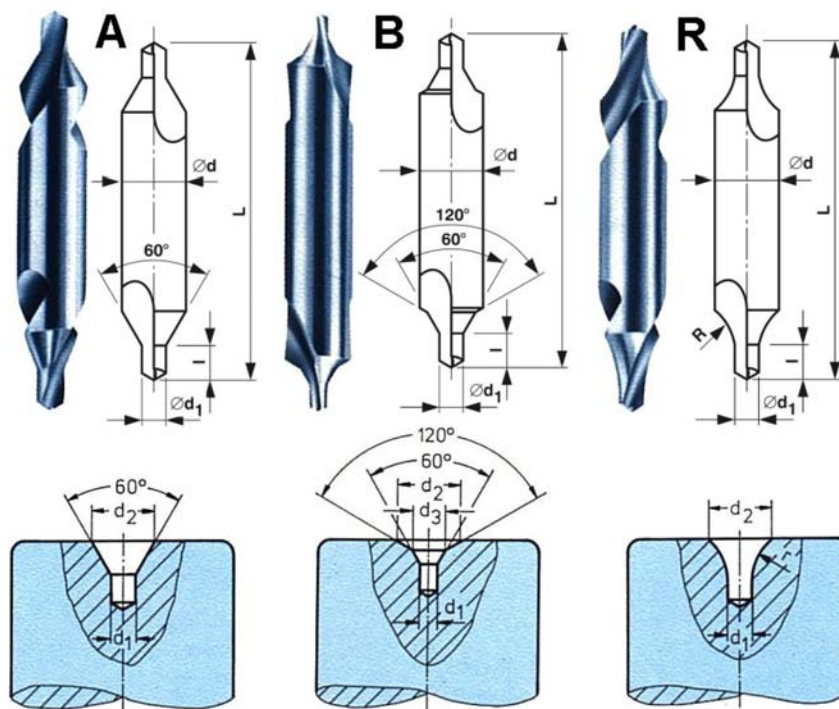
3.3 Nástroje pro vrtání

Dle [2] je nástroj pro vrtání definován jako nástroj s jedním, nebo několika čelně obrábějícími břity a současně opatřen jednou nebo několika šroubovitými či přímými drážkami pro odvod třísek. Řezná rychlost se u nich mění podél hlavního ostří od maxima na obvodu nástroje po nulovou hodnotu v jeho ose. Požadavky na utváření třísky a její odchod jsou vyšší než u nástrojů pro soustružení a frézování.

Podle technologie vrtání a druhu, konstrukce a geometrie nástroje lze vrtáky rozdělit o několika hlavních skupin [19]:

Středicí vrtáky:

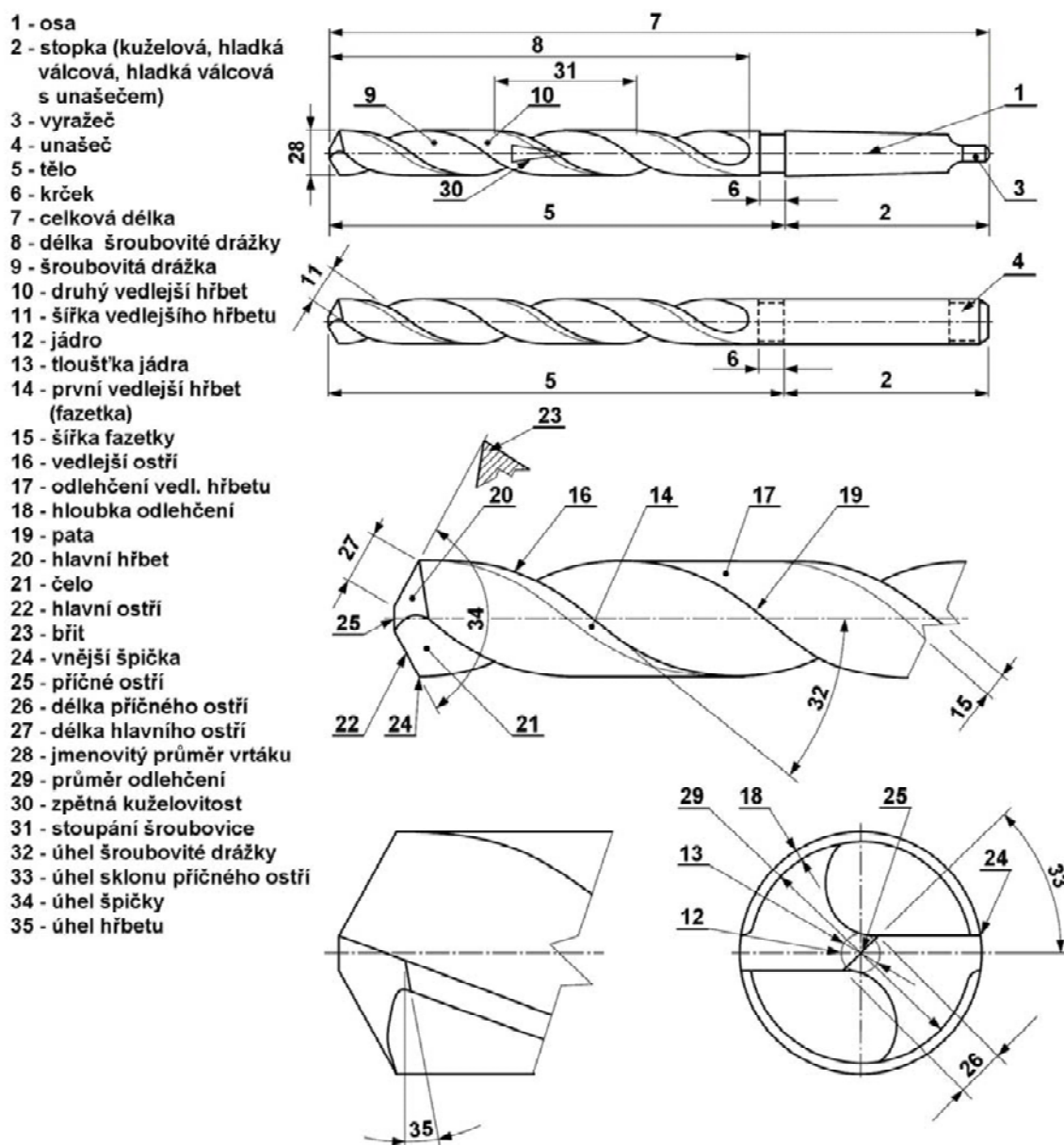
Používají se k navrtání otvoru do plného materiálu a velmi často také k vytvoření středicího otvoru k upnutí polotovaru například na soustruhu či brusce.



Obr. 3.19 Středicí vrtáky [19]

Šroubovitě vrtáky:

Nejčastěji používané nástroje pro vrtání krátkých děr (poměr $L/D = 5 \div 10$, kde D je průměr díry, L je délka díry). Válcové tělo vrtáku má nejčastěji dvě protilehlé šroubovice (může jich však mít i více), které odvádějí třísku z místa řezu a mohou také sloužit k přívodu řezné kapaliny. Jmenovitého rozměru dosahuje průměr vrtáku na hřbetní fazetce a směrem ke stopce se mírně kuželovitě zmenšuje. Úhel špičky se liší dle obráběného materiálu (např.: nelegované oceli střední pevnosti, litiny střední tvrdosti: $\varepsilon_r = 118^\circ$, těžkoobrobitelné materiály: $\varepsilon_r = 140^\circ$, plasty a tvrdé pryže: $\varepsilon_r = 90^\circ$) [19] a může mít i dva úhly (snížení opotřebení, jelikož je nižší tepelné namáhání, a snížení posuvové síly) [19]. Příčné ostří, které spojuje hlavní ostří, naopak působí negativně na velikost posuvové síly i krouticího momentu. Proto se při konstrukci vrtáku používají různé úpravy příčného ostří (např.: zkrácení podbroušením, různé tvary příčného ostří, či jeho úplné odstranění). Nástrojové úhly hřbetu i čela se u šroubovitých vrtáků podél hlavního ostří mění. Nejčastěji se vyrábějí z rychlořezné oceli, dále jako monolitní vrtáky ze slinutých karbidů (povlakované i nepovlakované) nebo s pájenými či vyměnitelnými břitovými destičkami (viz dále). Pro lepší přívod řezné kapaliny do místa se používají otvory v těle vrtáku.



Obr. 3.20 Základní parametry šroubovitého vrtáku [19]

Kopinaté vrtáky

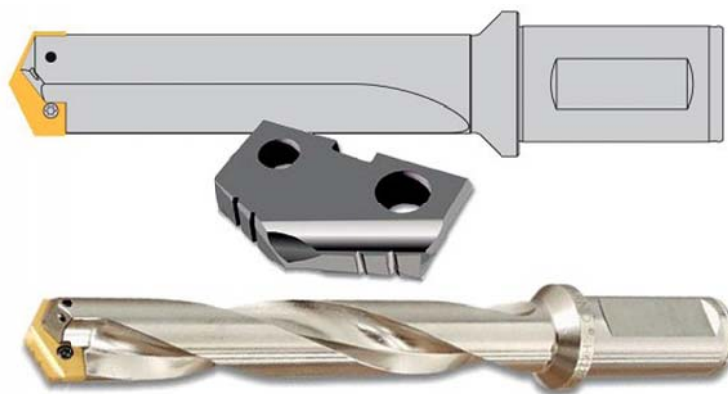
Používají se pro vrtání děr do plného materiálu. Vyznačují se vysokou tuhostí, proto jsou používány, mimo jiné, pro vrtání hlubokých děr s poměrem délky díry a jejího průměru L/D více než 10. Většina těchto vrtáků je v současnosti vyráběna s centrálním přívodem řezné kapaliny, který zajišťuje účinné chlazení nástroje a dobrý odvod třísky. Řezná kapalina vstupuje do nástroje otvory ve stopce nástroje, za kterou se upíná do stroje. V těle nástroje může být přímá, nebo šroubovitá drážka pro odvod třísky.

Dle konstrukčního uspořádání rozlišujeme kopinaté vrtáky na celistvé z rychlořezné oceli a vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami, které jsou většinou vyrobeny ze slinutých karbidů. Vrtáky s VBD jsou dnes častěji

využívány, jelikož výměna VBD v případě opotřebení je snazší a rychlejší, než výměna celistvého nástroje.

Břítové destičky se dle výrobců liší svojí geometrií i použitým materiálem pro jejich výrobu. Pro tvorbu vhodného tvaru a velikosti třísky (z důvodu jednoduššího odvodu) mají tzv. lamače třísky často ve formě drážek (viz. obr. 3.21). Na hlavních hřbetech destiček mohou být fazetky pro snížení tření ve vrtané díře.

Drsnost povrchu díry vrtané kopinatým vrtákem však dosahuje horších parametrů než při použití šroubovitého vrtáku.



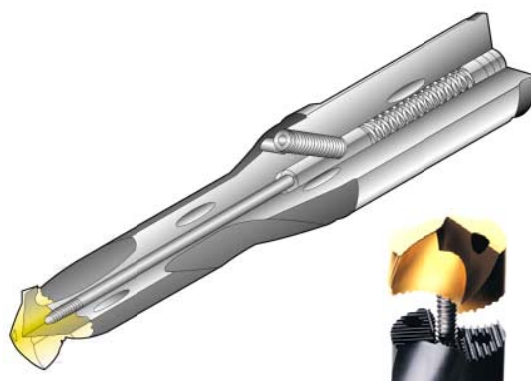
Obr. 3.21 Kopinaté vrtáky SHARK-Drill německé firmy Arno [4]

Vrtáky s vyměnitelnou špičkou

Tyto nástroje lze podle konstrukce špičky rozdělit do dvou skupin. V prvním případě je špička ve formě vyměnitelné břítové destičky, ve druhém je špička ve formě hlavice. U obou typů se v současnosti lze setkat s centrálním přívodem řezné kapaliny. Na obr. 3.22 je vrták Chamdrill FF firmy Iscar, který umožňuje upnutí čtyř rozdílných typů vrtacích břítových destiček pro různé obráběné materiály. Ústí otvorů pro přívod řezné kapaliny vnitřkem nástroje se nachází těsně u čela každého břitu, díky čemuž je zaručen účinný odvod třísky z místa obrábění.



Obr. 3.22 Vrták Chamdrill FF firmy Iscar s vnitřním chlazením (špička ve formě vyměnitelné břítové destičky) [25]

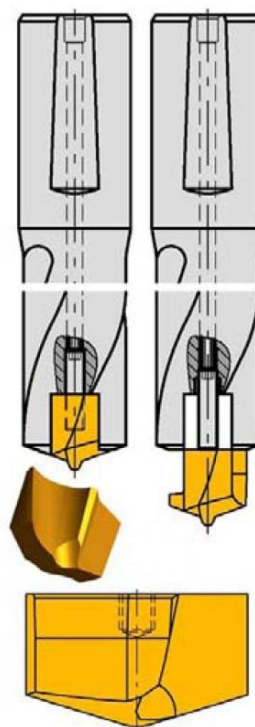


Obr. 3.23 Vrták CrownLock firmy Seco (špička ve formě hlavice) [45]

Upnutí destičky bývá obvykle provedeno šroubem kolmo na osu nástroje. Osa šroubu však nemusí být vždy kolmo k povrchu destičky. Vrtáky Xtra.tec firmy Walter mají upínací šroub oproti povrchu destičky skloněn přibližně o 45° (obr. 3.24), což zajišťuje přesné nastavení a spolehlivé v radiálním i axiálním směru. Například firma Kennametal však u svých vrtáků řady KSEM používá axiální systém upnutí, kdy závit je přímo v tělese destičky a destička je do vybrání v tělese dotažena šroubem v tělese vrtáku (obr. 3.25). Firma Seco u svých vrtáků s vyměnitelnou hlavicí CrownLock používá originální, stabilní a spolehlivé upnutí hlavice. Ta je našroubována na tažnou tyč ve středu nástroje a upnutí je zajištěno šikmým šroubem (obr. 3.23), kdy do sebe zapadnou V drážky v hlavici a tělese nástroje.



Obr. 3.24 Vrták Xtra.tec firmy Walter [19]



Obr. 3.25 Vrták KSEM firmy Kennametal [19]

Vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami

Nejběžnější nástroj spadající do této skupiny je vrták s asymetricky uspořádanými břity, které se mohou překrývat. Jelikož se řezná rychlost podél hlavního ostří mění, je výhodné použití rozdílných obvodových a středových destiček, což se týká jak použitého slinutého karbidu a případného povlakování, tak i geometrie břitové destičky.

Destičky jsou u nástrojů menších průměrů upnuty pomocí zapuštěných šroubů do tělesa nástroje. U nástrojů větších průměrů se břitové destičky upínají pomocí vyměnitelných kazet, díky nimž lze na jednom tělese do určité míry měnit jmenovitý průměr. Stejně jako u soustružení a frézování je i zde sortiment vyměnitelných destiček velmi široký. Díky tomu lze zvolit destičku optimální pro dané použití, čímž lze zlepšit odvod třísky, snížit hodnoty řezných odporů, zlepšit trvanlivost a také snížit řezné síly a krouticí moment. Lze se také

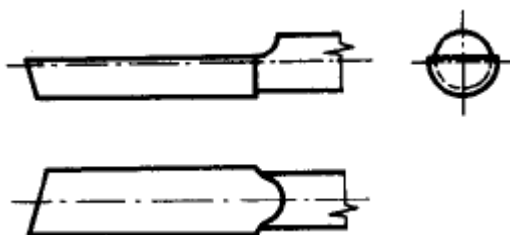
setkat s destičkami se čtyřmi břity, jejichž dva břity jsou určeny pro středovou a dva pro odvodovou polohu na nástroji.

Dá se říci, že všechny vrtáky s VBD mají centrální přívod řezné kapaliny. Vrtáky nejen pro vrtání hlubokých děr bývají na obvodu opatřeny vodítky pro snížení tření a přesné vedení nástroje ve vrtaném otvoru.

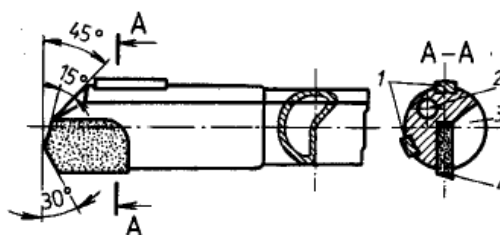
Dělové a hlavňové vrtáky

Oba typy se používají pro výrobu hlubokých děr. Hluboká díra je definována poměrem délky L a průměru D otvoru větším než 5 (10).

Dělové vrtáky se používají pro výrobu otvorů o průměru 40 mm a vyšším. Nevýhodou dělových vrtáků je geometrie, která není schopna odvádět třísky z místa řezu. Je nutné nástroj po vyvrtání určité hloubky vytáhnout a třísky odstranit. Proto se dělové vrtáky používají pro menší hloubky děr. Řezná část vrtáku má tvar půlválce, má jeden břit a jeho vnější strana je zaoblena (obr. 3.26). Mírná kuželovitost a malé fazetky na obvodě řezné části snižují tření ve vrtané díře. Břit se vyrábí z rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu a k tělesu nástroje může být připájen, nebo mechanicky upnut.

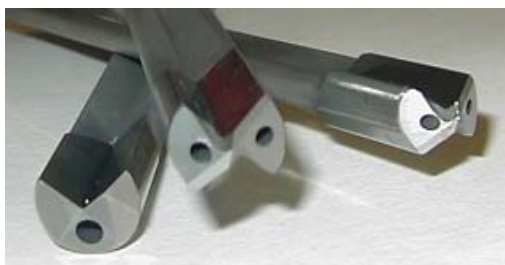


Obr. 3.26 Dělový vrták [55]

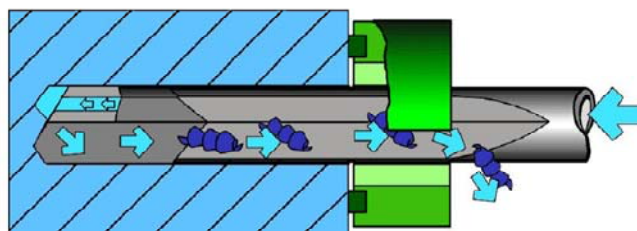


Obr. 3.27 Dvoubřitý hlavňový vrták [55]

Hlavňovými vrtáky lze dosáhnout vyšší přesnosti vrtané díry. Řezná část, kterou se liší od dělových vrtáků (viz obr. 3.28), může být z rychlořezné oceli, slinutého karbidu nebo v provedení s připájenými břitovými destičkami. Konstrukce nástroje umožňuje odvod třísek buď jeho středem u dutých nástrojů, nebo drážkou v jeho těle (obr. 3.29). Potřebná délka nástroje je zajištěna trubkou či tyčí, k níž je řezná část připojena. Nástroj je středěn pomocí vodítek na tělese nástroje. Samozřejmostí je centrální přívod řezné kapaliny.



Obr. 3.28 Hlavňové vrtáky [49]



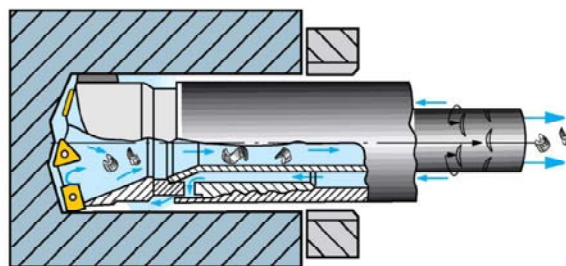
Obr. 3.29 Odvod třísky při vrtání hlavňovým vrtákem [19]

Ejektorové vrtáky

Slouží nejčastěji k výrobě děr o průměru $D = 20 \div 60$ mm a délkách až $100 \times D$ v horizontálním směru nebo $50 \times D$ ve vertikálním směru [19]. Skládají se z vrtací hlavice, vnější vrtací trubky, do které je hlavice našroubována, vnitřní trubky, kleštiny, spojky pro nerotující nástroj a těsnící objímky. Vyrábí se z nástrojové oceli. Používají se zde břitové destičky ze slinutých karbidů, případně jiných tvrdých materiálů, mechanicky upnuté do tělesa vrtací hlavice. Hlavice má po obvodu vodítka pro správné vedení nástroje ve vrtaném otvoru, taktéž vyrobená z SK. Mezikružím mezi vnější a vnitřní trubicí je přiváděna řezná kapalina do řezu. Tyto vrtáky dostaly název podle ejektorového efektu, kterým jsou odváděny třísky. Odcházející kapalina je nasávána štěrbinami v zadní části vnější trubky a odnáší s sebou oddělené třísky.



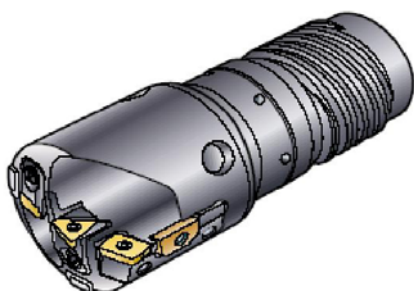
Obr. 3.30 Ejektorová hlavice typ 62
firmy Brotek [53]



Obr. 3.31 Princip ejektorového vrtání [19]

BTA (Boring and Trepanning Association) nebo STS (Single Tube System)

Oproti ejektorovým vrtákům mají vrtáky pro tyto metody větší rozsahy průměrů. Větší je také rozsah možností výroby otvorů. Lze vrtat do plného materiálu, do předvrtaného otvoru i tzv. na jádro. Dle toho se mírně liší konstrukce. Hlavice pro vrtání do plného materiálu má obvykle 4 břitové destičky, kdežto hlavice pro vrtání do předvrtané díry pouze jednu. Stejně jako u předešlých vrtáků, mají tyto hlavice na svém obvodu vodítka. Podle způsobu vrtání se však liší také maximální možné průměry zhotovované díry. Vrtací hlavice pro vrtání do plného materiálu se vyrábí do průměru 180 mm, pro vrtání „na jádro“ mají vrtací hlavice rozsah průměrů $120 \div 300$ mm. [19]

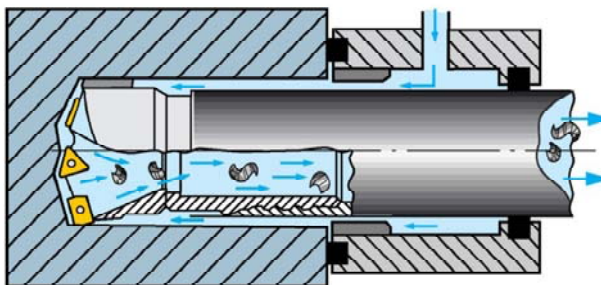


Obr. 3.32 Hlavice pro vrtání do plna [1]



Obr. 3.33 Hlavice pro vrtání do
předvrtaného otvoru [1]

Přívod kapaliny je zajištěn mezikružím mezi stěnou zhotovované díry a tělesem vrtáku, kdežto odvod jeho středem. Vzhledem k vyšším tlakům řezné kapaliny je nutné použít těsnění mezi přírubu a čelo obrobku. Odváděná kapalina s sebou středem nástroje odnáší i třísky.



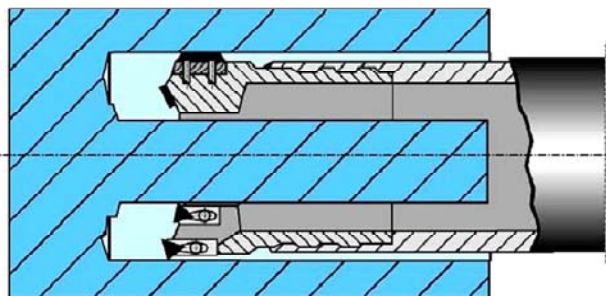
Obr. 3.34 Princip funkce BTA a STS vrtáku [19]

Korunkové vrtáky

Korunkové neboli trepanační vrtáky se používají k vrtání průchozích děr většího průměru tzv. způsobem „na jádro“, kdy je odřezán materiál ve tvaru mezikruží a zůstává kompaktní jádro. Nástroj je konstrukčně velmi podobný (či stejný) plné vrtací hlavě BTA, je dutý a má břitové destičky na vnitřním i vnějším obvodě.



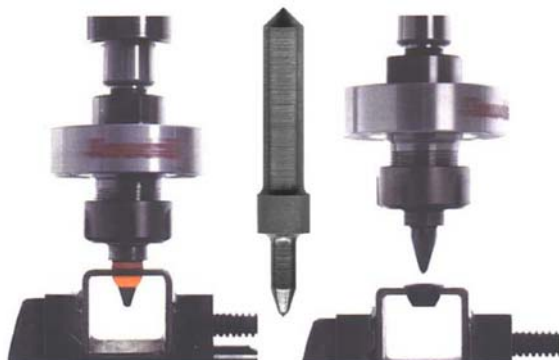
Obr. 3.35 Vrtací hlavice na jádro [53]



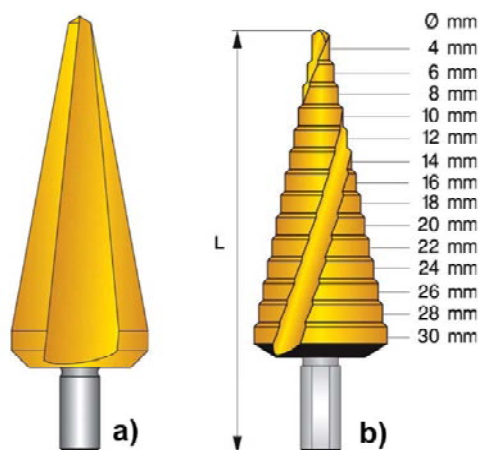
Obr. 3.36 Princip vrtání „na jádro“ [19]

Vrtáky do plechu

Při vrtání děr do plechu lze použít například termální tvářecí vrták, což je v podstatě hladký kuželový hrot ze slinutého karbidu (obr 3.37). Výhodné je také použití širokorozsahového či odstupňovaného vrtáku, protože místo celé sady vrtáků pro různé průměry nám stačí jeden.



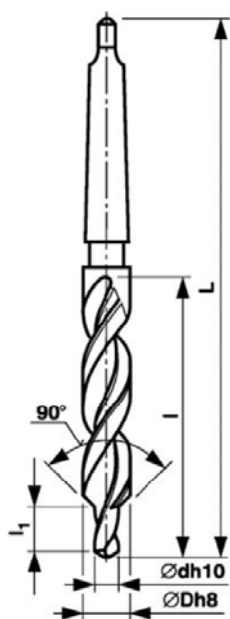
Obr. 3.37 Termální vrtání díry v tenkostěnném ocelovém profilu [19]



Obr. 3.38 Vrtáky do plechu německé firmy Ruko [19]
a) širokorozsahový, b) odstupňovaný

Kombinované vrtáky

Mezi tyto nástroje patří odstupňované vrtáky, které se používají v případě vrtání dvou i více průměrů najednou jedním nástrojem a také vrtáky, které umožňují slučování operací. Obvyklá je kombinace vrtání a srážení hran nebo zahlubování (válcové, kuželové) na vstupní straně vrtaného otvoru. Firma Yestool vyrábí kombinovaný nástroj s označením One-pass (obr. 3.41), který umožňuje srážení hrany i na výstupní straně díry. Destička ze slinutého karbidu je odpružená, po srážení vstupní hrany se zatlačí do těla nástroje a po průchodu je opět pružinou vrácena do pracovní polohy.



Obr. 3.39 Monolitní odstupňovaný vrták [19]



Obr. 3.40 Kombinovaný vrtací systém HP BF firmy Kennametal [38]



Obr. 3.41 Kombinovaný nástroj One-pass firmy Yestool [54]

Taktéž se lze setkat s nástroji, které spolu s vrtáním současně vystružují, či řezou závit. Tyto nástroje jsou vhodné při výrobě velkých sérií součástek na CNC obráběcích strojích, protože významně zkracují vedlejší časy (výměna nástroje, odjetí a návrat z místa výměny nástroje) a tím snižují náklady na výrobu.

Tyto nástroje mohou být monolitní (např. vybroušeny z klasického šroubovitého vrtáku), kombinované s vyměnitelnými destičkami, nebo ve formě příslušenství ke klasickým nástrojům. Jak uvádí [38], kombinovaný vrtací nástroj HP BF firmy Kennametal (obr. 3.40) má zajistit až 50% zvýšení rychlosti úběru materiálu oproti monolitním stupňovitým vrtákům ze slinutých karbidů. K tomu mu pomáhá kvalitní chlazení, patentovaná geometrie špičky, zlepšená konstrukce tělesa nástroje a progresivní mnohovrstvý PVD povlak.

4 ŘEZIVOSTNÍ VLASTNOSTI

Řezivost nástroje lze popsat jako jeho schopnost efektivně odebírat třísku z obráběného dílu. Řezivost je komplexní vlastnost, která zahrnuje fyzikální a mechanické vlastnosti nástroje, způsob obrábění, charakteristiku řezného prostředí a taktéž se vztahuje k obráběnému materiálu. Běžný a jednoduchý způsob hodnocení je T - v_c závislost, který vychází z Taylorova vztahu [18]:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (4.1)$$

kde: T ... trvanlivost [min]

C_T ... konstanta [-]

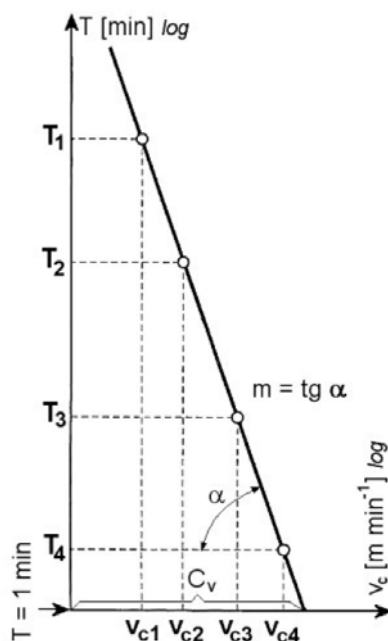
m ... exponent [-]

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

a jelikož $C_v = C_T^{1/m}$ lze tento vztah upravit na tvar [18]:

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} \quad (4.2)$$

kde: C_v ... konstanta [-]

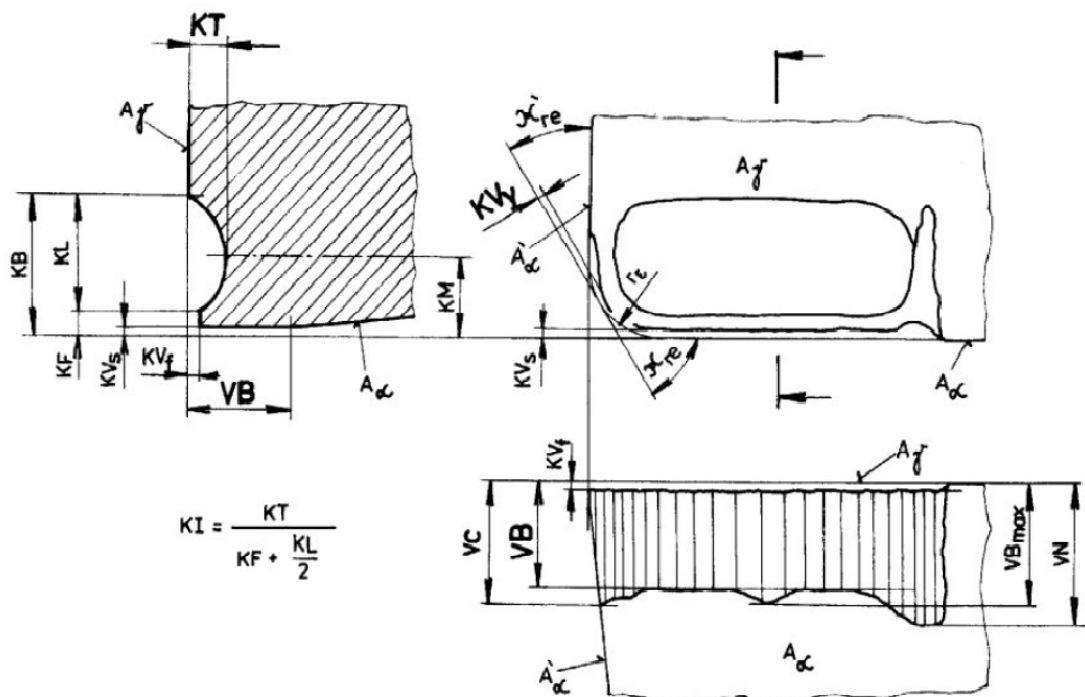


Obr. 4.1 T - v_c závislost [18]

Obecně lze konstatovat, že lepší řezivosti dosahují řezné materiály s vyšší hodnotou konstanty C_v a nižší hodnotou exponentu m . [18]

Trvanlivost nástroje T je celkový čas obrábění až po dosažení určené hodnoty vybraného kritéria opotřebení. Nejčastěji jsou používána následující 3 kritéria (viz obr. 4.2):

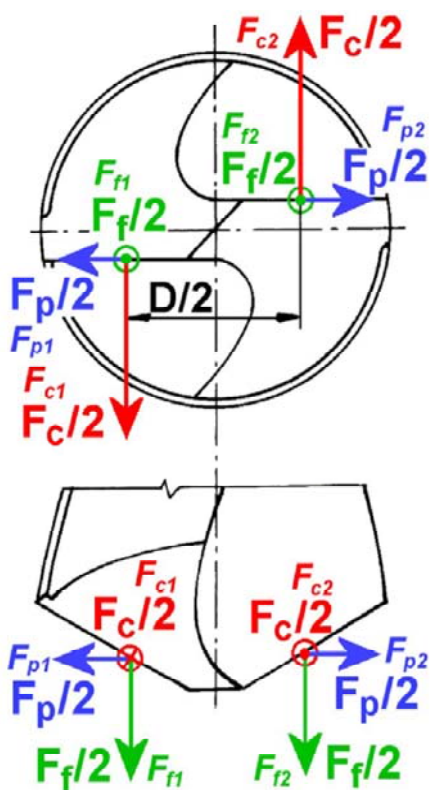
- **VB** - šířka fazetky opotřebení na hřbetě (nejpoužívanější)
- **KT** - hloubka výmolu na čele
- **KV_y** - radiální opotřebení špičky



Obr. 4.2 Kritéria opotřebení řezného nástroje [18]

5 ANALÝZA ŘEZIVOSTI ŠROUBOVITÝCH VRTÁKŮ

Technologické zkoušky pro srovnání řezivosti byly provedeny na dvou typech celokarbidových, nepovlakovaných vrtáků vyráběných firmou Rotana, a.s., Velké Meziříčí. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí měření zatížení nástroje a to posuvové (axiální) síly F_f a řezného (kroutícího) momentu M_c . Dále byla vyhodnocena měrná energie procesu vrtání. Tato metoda vyhodnocení je vhodná pro srovnání nástrojů s odlišnou konstrukcí. Z časového hlediska jde o zkoušky krátkodobé, které nezahrnují vliv opotřebení nástroje, který v tomto konkrétním případě lze vzhledem k délce vrtaného otvoru (viz popis zkušebního obrobku) zanedbat.



Obr. 5.1 Řezné síly při vrtání [19]

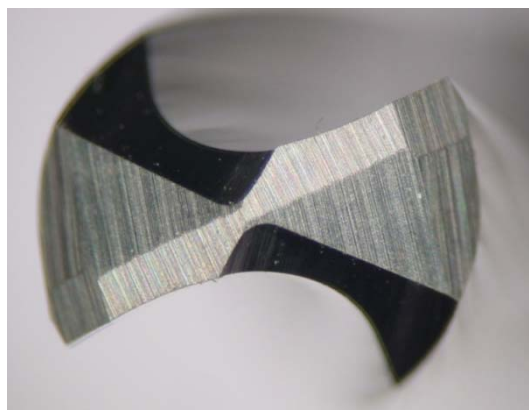
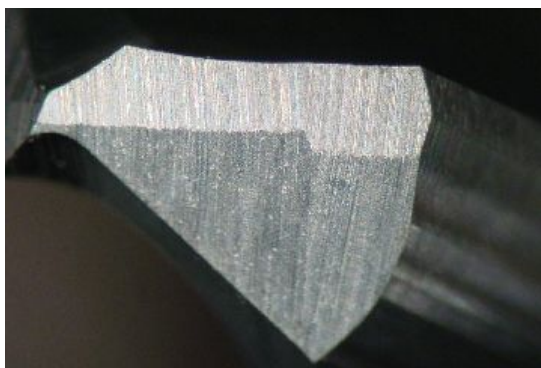
Výpočet měrné energie vrtání byl proveden podle vztahu zahrnujícího obě měřené veličiny (krouticí moment a posuvovou sílu) [11]:

$$e_{c(i)} = \left(\frac{1}{D^2} \right) \cdot \left(\frac{8 \cdot M_{c(i)}}{f + 0,0012732 \cdot F_{f(i)}} \right) [J \cdot cm^{-3}] \quad (5.1)$$

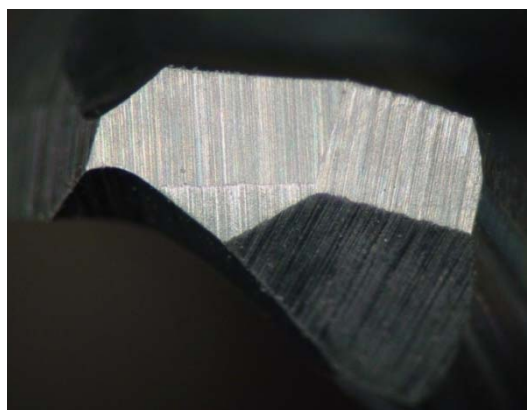
kde: D ... průměr vrtáku [mm]

M_c ... krouticí moment [Nm]

F_f ... posuvová síla [N]

Testované vrtáky

Obr. 5.2 Vrták 1600-0 před zkouškou



Obr. 5.3 Vrták 1600-1 před zkouškou

Obrobek

Testování bylo prováděno na dodaném obrobku z niklové slitiny typu Inconel 718. Inconel 718 je precipitačně vytvrditelná niklová slitina s výbornými tahovými vlastnostmi a odolností proti Creepu až do teploty 700 °C. Vyznačuje se také odolností proti korozi a vysokou pevností. Pomalé stárnutí umožňuje žíhání a svařování, aniž by došlo k samovolnému zakalení v průběhu ohřevu a ochlazení. Tato slitina má v porovnání s jinými niklovými slitinami vytvrzovanými hliníkem a titanem vynikající svařitelnost. Používá se převážně v leteckém průmyslu a kosmonautice, v parních turbínách, jaderných reaktorech atd. Podle normy ČSN ISO 513 jsou pro obrábění této slitiny vhodné slinuté karbidy skupiny S. [14]

Tab. 5.1 Chemické složení slitiny Inconel 718 [14], [35]

Prvek	Obsah [%]
Ni	50 ÷ 55
Cr	17 ÷ 21
Nb + Ta	4,75 ÷ 5,50
Mo	2,80 ÷ 3,30
Ti	0,65 ÷ 1,15
Al	0,20 ÷ 0,80
Zr	0,02 ÷ 0,12
Co	max. 1
Mn	max. 0,35
Si	max. 0,35
Cu	max. 0,1
C	max. 0,08
S	max. 0,015
P	max. 0,015
B	max. 0,006
Fe	zbytek

Tab. 5.2 Vybrané vlastnosti slitiny Inconel 718 [3], [35]

Měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	Teplota tavení [°C]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Modul pružnosti ve smyku [GPa]	Tvrdost HRC	Mez pevnost v tahu [MPa]
8,19	1 336	204,9	77,2	36	1 240



Obr. 5.4 Obrobek

Řezné podmínky

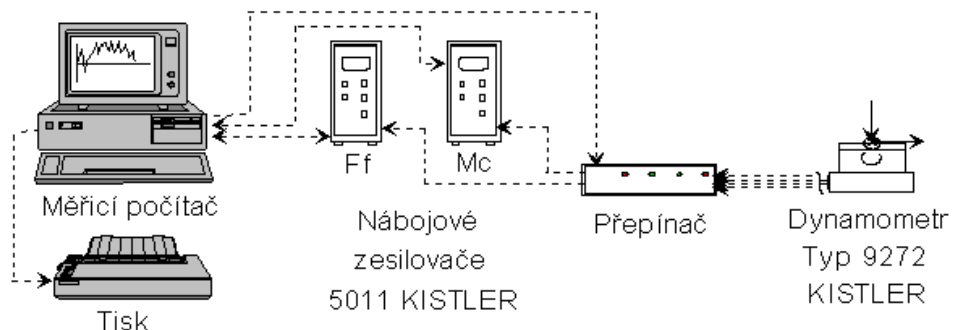
Řezné podmínky při testování byly nastaveny dle požadavků výrobce vrtáků, firmy Rotana, a.s., Velké Meziříčí.

Tab. 5.3 Použité řezné podmínky v daných testech

Řezné podmínka	Hodnota
řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	4,5
otáčky n [min ⁻¹]	240
posuv na otáčku f [mm]	0,05
druh chlazení	molybdenový řezný olej
způsob mazání	ruční

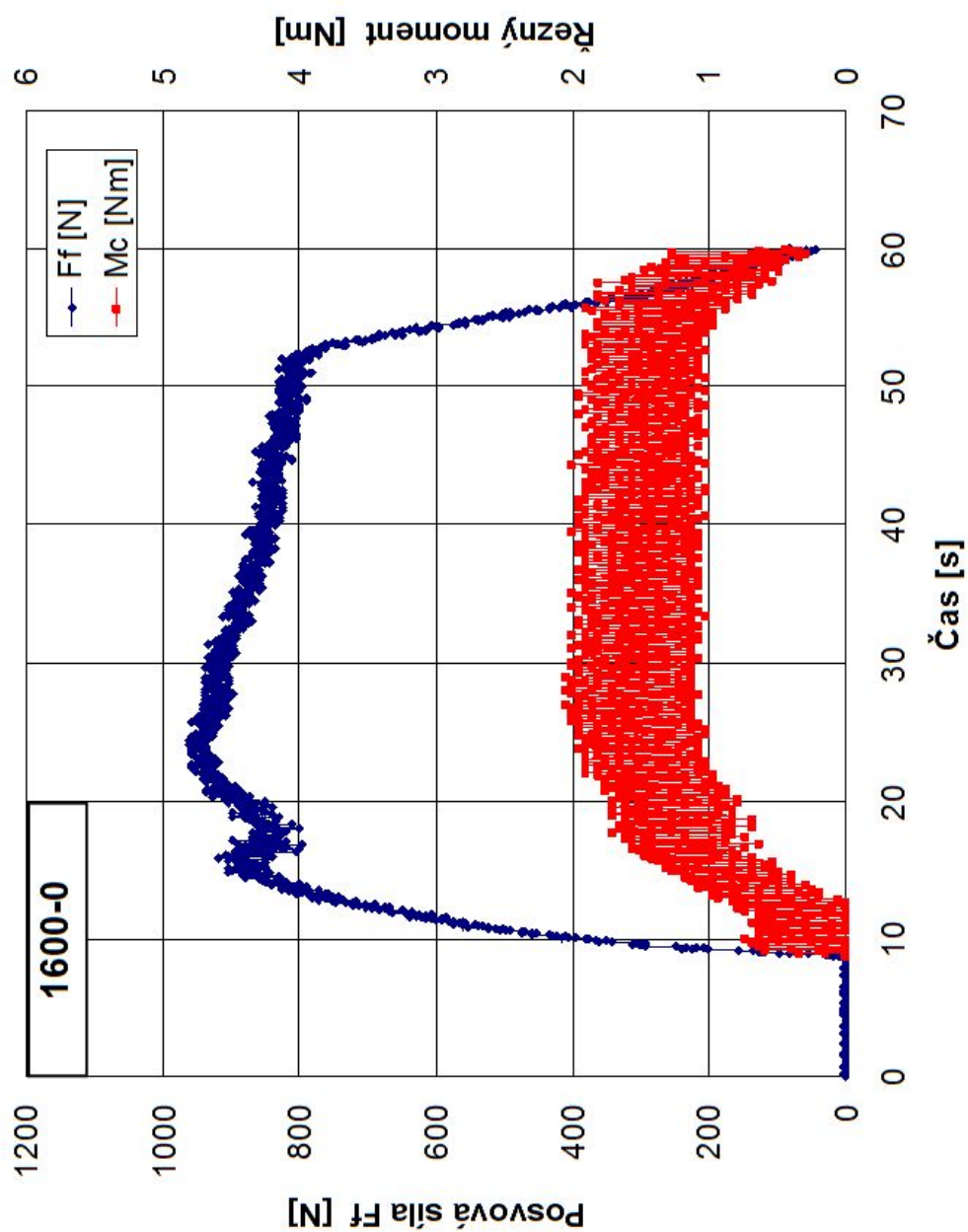
Použité zařízení

Konzolová frézka FV 25 CNCA/ Heidenhaim iTNC 530, hydraulické sklíčidlo Röhms 6x42.

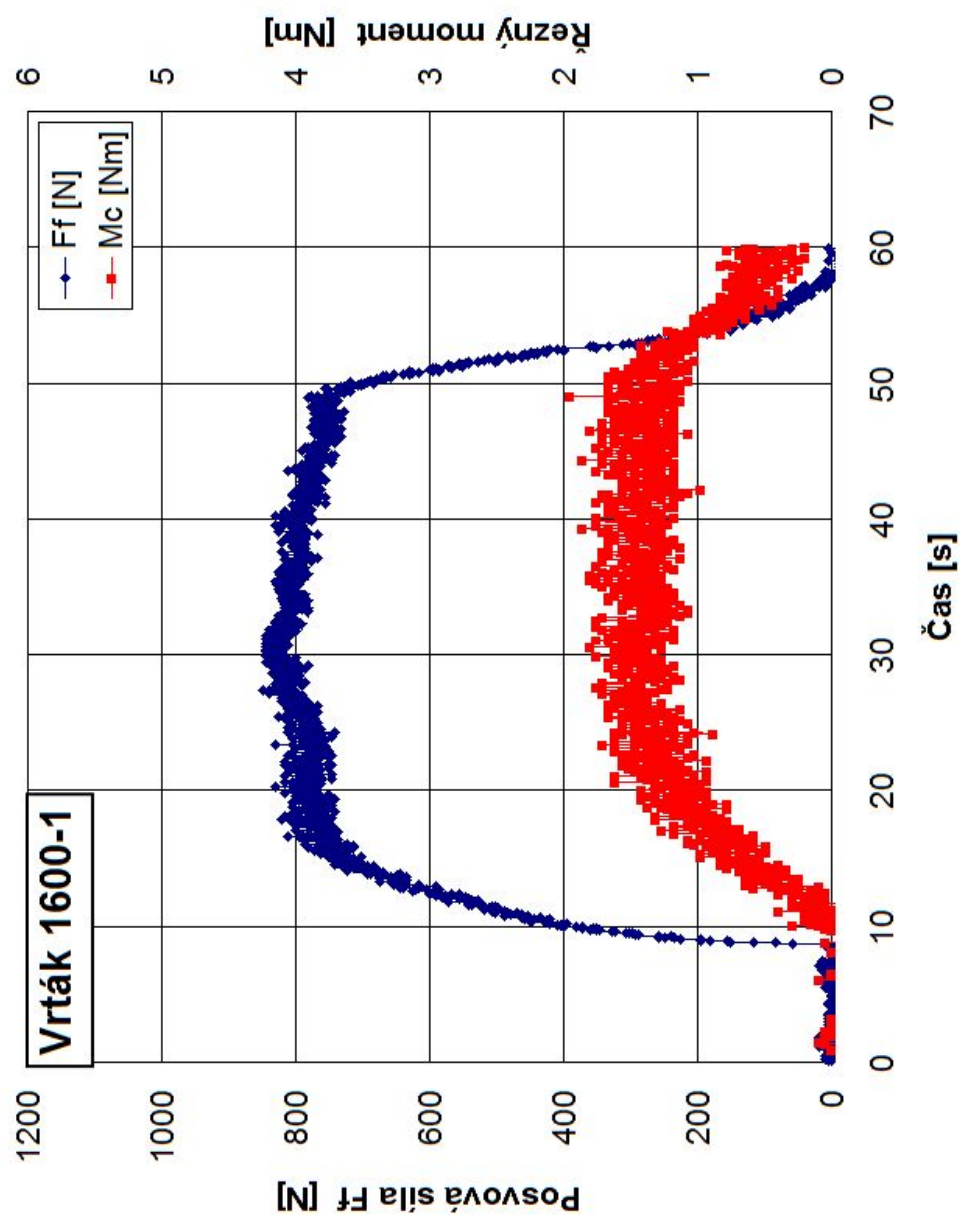


Obr. 5.5 Schematické znázornění snímání měřených veličin [10]

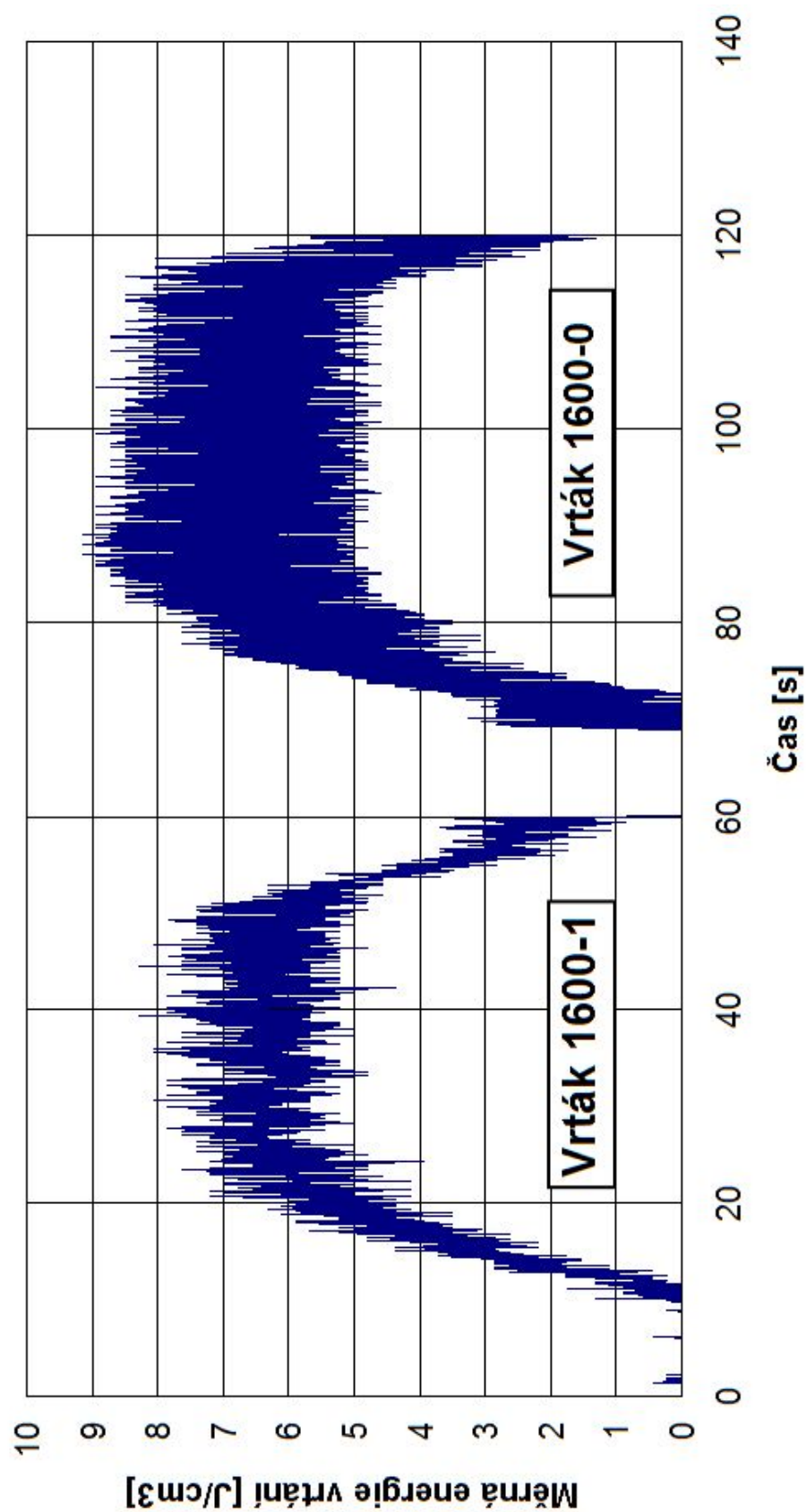
5.1 Vyhodnocení testu řezivosti



Obr. 5.6 Průběh posuvové síly a řezného momentu vrtáku 1600-0



Obr. 5.7 Průběh posuvové síly a řezného momentu vrtáku 1600-1

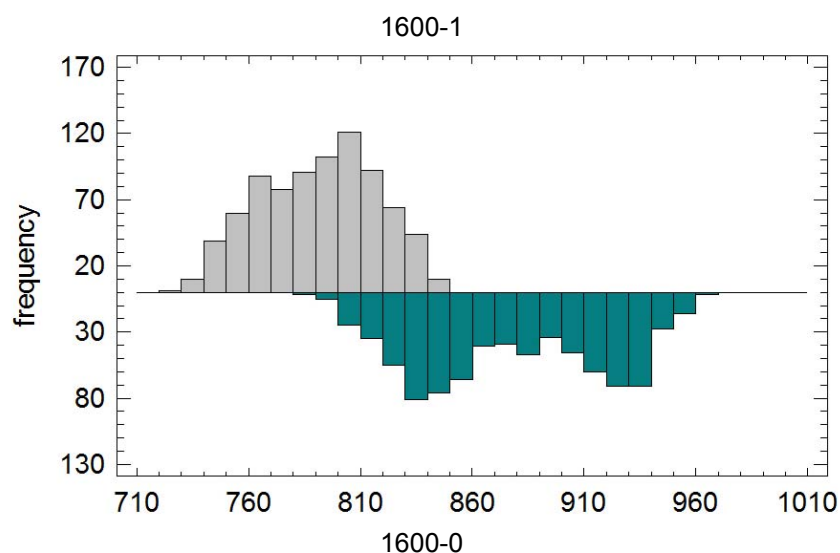


Obr. 5.8 Průběh měrné energie vrtáků 1600-1 a 1600-0

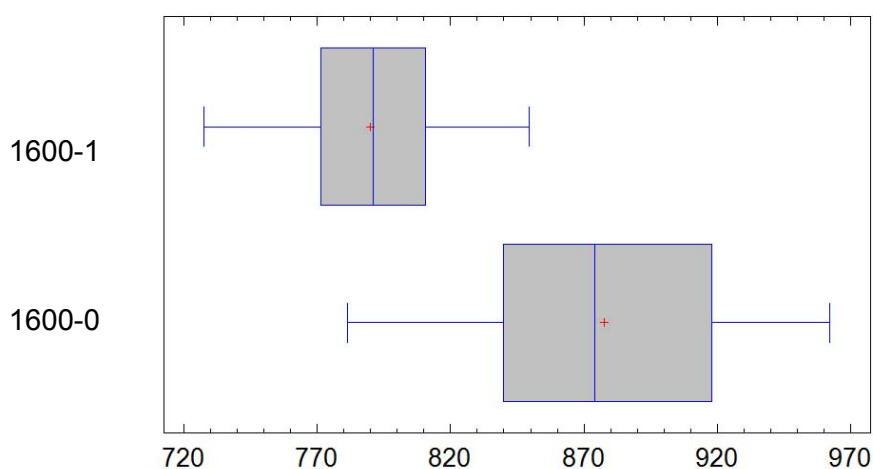
Statistické vyhodnocení posuvových sil

Tab. 5.2 Statistická charakteristika hodnot posuvové síly (software Statgraphics)

	1600-1	1600-0
Četnost (Count)	800	800
Střední hodnota (Average)	790,003	877,705
Směrodatná odchylka (Standard deviation)	25,6018	43,6777
Variační koeficient (Coeff. of variation)	3,24072 %	4,97635 %
Minimální hodnota (Minimum)	727,5	781,3
Maximální hodnota (Maximum)	849,6	961,9
Rozsah (Range)	122,1	180,6
Koeficient asymetrie (Std. skewness)	-0,682276	0,110359
Koeficient špičatosti (Std. kurtosis)	-4,26826	-7,02599



Obr. 5.9 Histogram

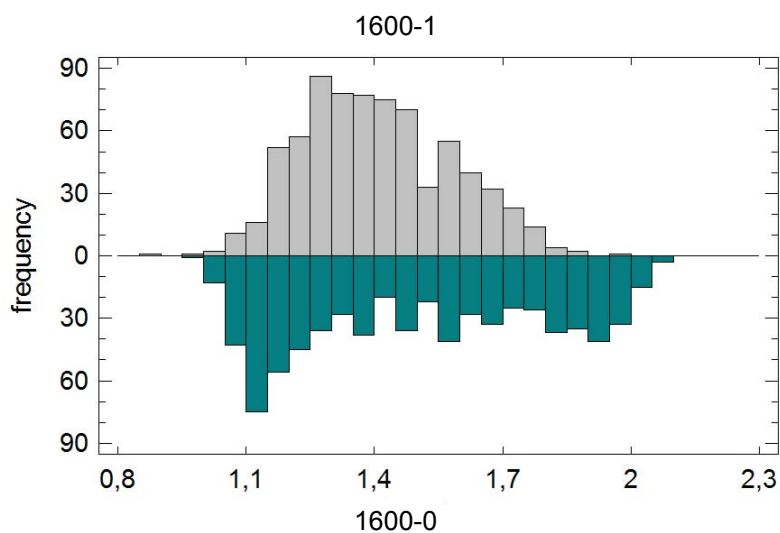


Obr. 5.10 Krabicový graf

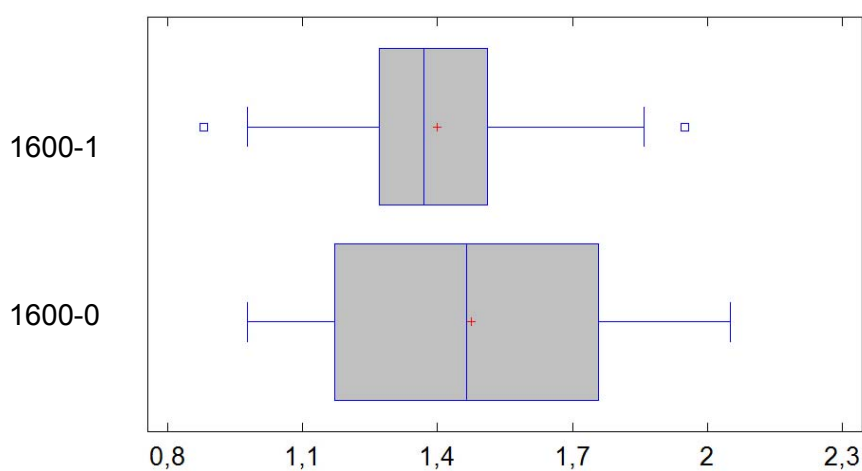
Statistické vyhodnocení řezných momentů

Tab. 5.3 Statistická charakteristika hodnot řezných momentů (software Statgraphics)

	1600-1	1600-0
Četnost (Count)	730	730
Střední hodnota (Average)	1,39875	1,47549
Směrodatná odchylka (Standard deviation)	0,171034	0,297868
Variační koeficient (Coeff. of variation)	12,2276 %	20,1877 %
Minimální hodnota (Minimum)	0,879	0,9766
Maximální hodnota (Maximum)	1,95	2,051
Rozsah (Range)	1,071	1,0744
Koeficient asymetrie (Std. skewness)	3,09583	2,23305
Koeficient špičatosti (Std. kurtosis)	-2,18814	-7,24753



Obr. 5.11 Histogram

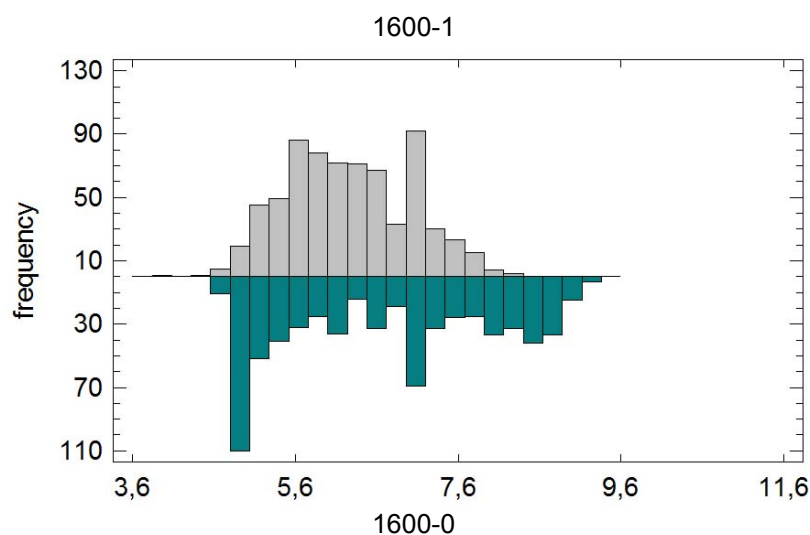


Obr. 5.12 Krabicový graf

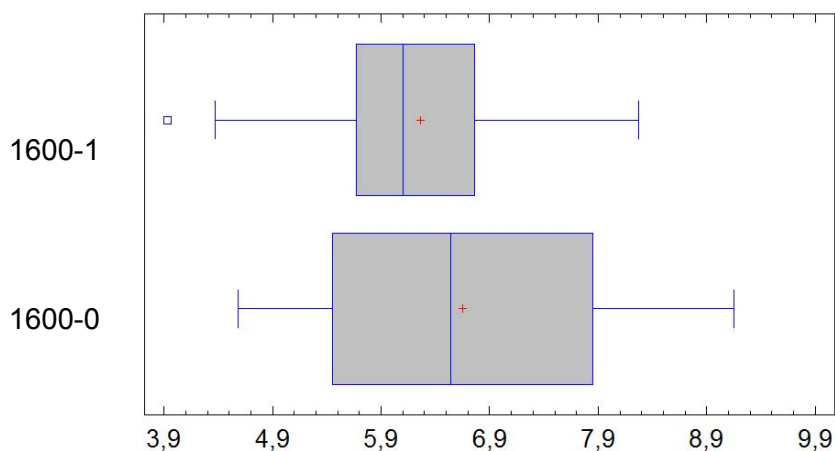
Statistické vyhodnocení měrných energií vrtání

Tab. 5.4 Statistická charakteristika hodnot měrné energie (software Statgraphics)

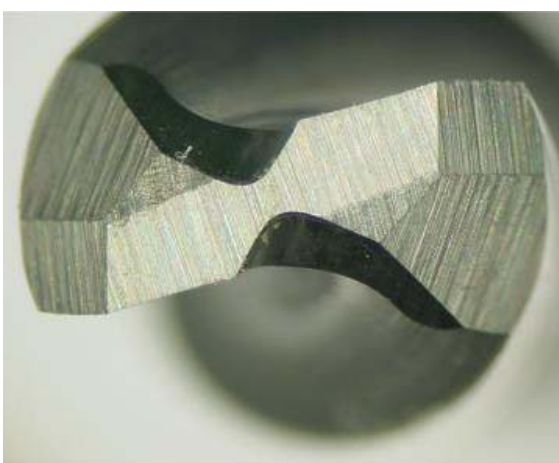
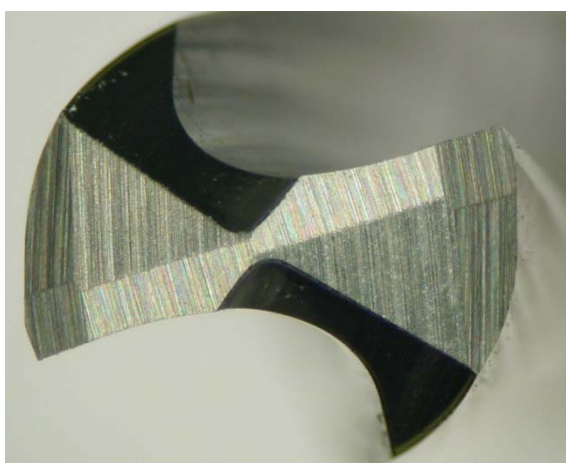
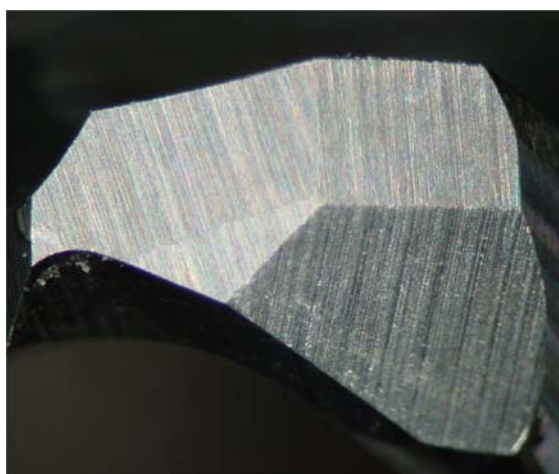
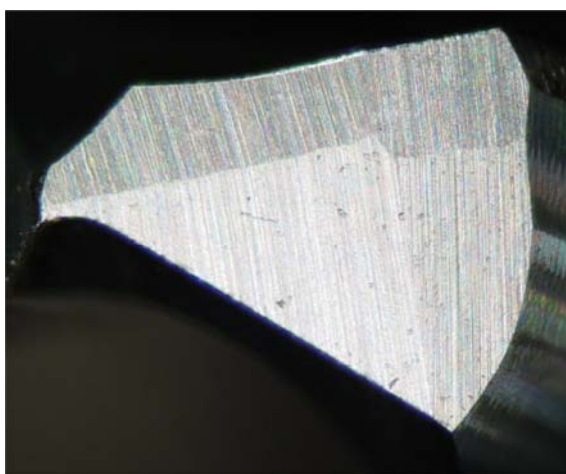
	1600-1	1600-0
Četnost (Count)	693	693
Střední hodnota (Average)	6,26088	6,6519
Směrodatná odchylka (Standard deviation)	0,750596	1,33801
Variační koeficient (Coeff. of variation)	11,9887 %	20,1147 %
Minimální hodnota (Minimum)	3,934	4,584
Maximální hodnota (Maximum)	8,273	9,148
Rozsah (Range)	4,339	4,564
Koeficient asymetrie (Std. skewness)	2,9299	1,44988
Koeficient špičatosti (Std. kurtosis)	-2,47842	-7,3179



Obr. 5.13 Histogram



Obr. 5.14 Krabicový graf



1600-0

1600-1

Obr. 5.15 Vrtáky po provedení testu*Obr. 5.16 Ukázka třísek*

Z grafického znázornění naměřených hodnot i jejich statistického vyhodnocení je patrné, že vrták označený jako 1600-1 byl v průběhu testování vystaven nižšímu namáhání posuvovou silou i krouticím momentem než vrták s označením 1600-0. Z toho také dle vzorce 5.1 plyne nižší energetické zatížení. U vrtáku 1600-1 je také jasně patrný menší rozptyl zkoumaných veličin (F_f , M_c , e_c). To svědčí o větší stabilitě procesu vrtání při použití tohoto vrtáku. Další výhoda v použití tohoto nástroje spočívá ve tvaru třísky, která se láme na jednotlivé segmenty (viz obr. 5.16). Taková tříska je výhodnější z důvodu lepšího odvádění z místa řezu a bezpečnosti obrábění. Drobná tříska také méně poškozuje obrobený povrch či nástroj, jelikož doba stejně jako plocha jejich kontaktu s třískou je kratší, než v případě dlouhé vinuté třísky. Na základě zjištěných skutečností byl vrták označený jako 1600-1 vyhodnocen jako vhodnější pro dané použití. Je však třeba brát zřetel na skutečnost, že zkoušky byly provedeny při vrtání minimálního počtu děr (každý vrták vrtal jednu díru).

ZÁVĚR

Trendem v oblasti obrábění je zvyšování efektivnosti a produktivity a snižování provozních nákladů. Tento trend je hnacím motorem vývoje řezných nástrojů. Jedná se o komplexní problém zahrnující jak problematiku řezných materiálů, tak konstrukci samotných nástrojů. V případě řezných materiálů je kladen především důraz na jejich tvrdost, houževnatost a chemickou stálost. Neexistuje však způsob, jak současně zlepšit tyto vlastnosti. V oblasti slinutých karbidů, kterými se zabývá tato práce, těmto požadavkům nejlépe vyhovují jemnozrnné substráty. Ty jsou dnes velmi často opatřeny otěruvzdornými povlaky, které dále zlepšují vlastnosti řezných nástrojů ze slinutých karbidů. Lze se setkat s multivrstevnými, nanokompozitními, supermřížkovými, nebo strukturně či funkčně gradientními povlaky, které dosahují lepších vlastností, než povlaky monovrstvé. Deponování povlaků je prováděno metodou CVD i PVD. Výrobci se však neustále věnují vývoji nových technologií povlakování. Je třeba také dbát na problematiku adheze mezi povlakovou vrstvou a substrátem.

Konstrukci nástrojů lze rozdělit do dvou částí. První se týká jejich makrogeometrie, druhá mikrogeometrie. V dnešní době je většina řezných nástrojů ze slinutých karbidů ve formě vyměnitelných břitových destiček mechanicky upnutých do držáku. Výrobci se zabývají jak vývojem celkových tvarů destiček a jejich držáků (makrogeometrie), tak i tvarů ostří, hladících fazetek, utvařečů a lamačů třísky apod. (mikrogeometrie). Cílem je zlepšit utváření třísky, snížit mechanické a tepelné zatížení nástroje, s čímž souvisí i zvýšení jejich trvanlivosti a ve výsledku také dosažení vyšší přesnosti a kvality obrobené plochy. Uplatnění na moderních CNC obráběcích strojích a centrech nachází čím dál častěji víceúčelové nástroje. Ty výrazně zkracují vedlejší časy při výrobě, jelikož není nutné nástroj před každou operací vyměňovat. Také šetří skladovací prostory. Výhodné jsou taktéž modulární nástrojové systémy, které lze sestavit přesně podle konkrétních požadavků zákazníka. V současnosti lze při verifikaci a realizaci řezných nástrojů použít moderní metody, jako jsou CAD/CAM systémy, či Rapid Prototyping.

Řezné nástroje, potažmo řezné materiály se také musí přizpůsobovat moderním trendům v obrábění. Těmi jsou obrábění vysokými řeznými rychlostmi, vysokými posuvy, obrábění za sucha, či s minimem procesní kapaliny. Obrábění za sucha s sebou přináší problém, kterým je vysoké kontaktní napětí v oblasti ostří. Téměř všechna mechanická práce se zde mění na teplo, což na nástroj působí negativně, jelikož dochází k difuznímu otěru. V tomto případě je výhodné použití nástrojů s lubrikační povlakovou vrstvou, která snižuje tření mezi odcházející třískou a nástrojem. Opačným trendem v použití procesní kapaliny v obrábění je její využití k intenzivnímu chlazení, kdy kapalina přispívá k lámání třísek. To je s výhodou používáno například u hlubokého vrtání. Chlazení je u moderních nástrojů nejčastěji provedeno vrtáním v jejich těle.

Je patrné, že výroba řezného nástroje, počínaje volbou řezného materiálu a jeho testováním konče, je velmi složitý proces. V praxi se na něm podílejí celé týmy odborníků. Vzhledem k neustálému vývoji nových konstrukčních materiálů nebo modernějších obráběcích strojů nelze očekávat, že se vývoj řezných nástrojů v blízké budoucnosti zastaví.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. [online] c2009. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.coromant.sandvik.com/cz>>
2. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
3. Alloy Wire International, UK [online], [cit. 2009-05-05], Dostupné na World Wide Web: <http://www.alloywire.com/inconel_alloy_718.html>
4. ARNO-Werkzeuge. Bohrsystem SHARK-Drill, Werkzeuge und Schneidplatten. [online]. Dostupné na World Wide Web:<<http://www.arno.de>>
5. Bunshah, R.F. et al. *Handbook of Hard Coatings*. Norwich, New York, USA: Noyes Publication/William Andrew Publishing, LLC. 2001. 550 p. ISBN 0-8155-1438-7.
6. CERATIZIT S.A., Hard materials matters. [online] c2009. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ceratizit.com/>>
7. Crystal Structures of Hard Materials. [online] c2004. Dostupné na World Wide Web: <http://www.hardmaterials.de/html/_crystal_structures.html>
8. Destefani, J., Cutting Tols – Coatings. Part 2 of three-parts series covering cutting tools Fundamentals focused on coating technology. *Manufacturing Engineering*. October 2002. pp. 47-51. [online]. [cit. 15. března 2009] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sme.org/gmn/mag/2002/02ocm002/02ocm002.pdf>>
9. EMUGE-FRANKEN servisní centrum, s.r.o., [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.emugefranken.cz/>>
10. Forejt, M., Humár, A., Píška, M., Janíček, L., *Experimentální Metody* [online]. [cit. 2009-04-20] Sylabus. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. Dostupné na World Wide Web: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf>.
11. FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Cerm, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
12. Gat, R., Swider, S., Kelly, E., CVD Diamond for Everyone. *Cutting Tool Engineering*. March 1995, Volume 47, Number 2 [online]. Dostupné na World Wide Web: < <http://www.ctemag.com/dynamic.articles.php?id=214> >
13. Gille, G., Szesny, B., Dreyer, K., van den Berg, H., Schmidt, J., Gestrich, T., Leitner, G. Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 20 (2002). pp. 3-22. ISSN 0263-4368
14. High Temp Metal, Inc., [online]. [cit. 2009-05-05], Dostupné na World Wide Web: <<http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718data.php>>
15. HOLUBÁŘ , Pavel, JÍLEK, Mojmír, RŮŽIČKA, Milan. Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. MM Průmyslové spektrum [online]. 2004, č. 9 [cit. 2009-03-25], s. 106. Dostupné na World Wide Web:

- <<http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-pvd-povlaky-pro-rezne-aplikace-a-tvareni>>. ISSN 1212-2572.
16. Humár, A., Materiály pro řezné nástroje. 1.vyd. Praha: MM publishing, s. r. o., 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2
 17. HUMÁR, A., PÍŠKA, M., Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové spektrum. Speciální vydání včetně CD. 110s. Praha, 2004, ISSN 1212-2572.
 18. Humár, A. *Technologie I. – 1. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-1cast.pdf>.
 19. Humár, A. *Technologie I. – 2. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-2cast.pdf>.
 20. Chin-Min Sung, J., Monteith, B., Sung, M., Amorphous Diamond Elektron Emitter. *Advanced Diamond Solution*. 2005 [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.advanceddiamond.com/AmorphDiamonds.pdf>>
 21. Choy, K.L., Chemical vapour deposition of coatings. *Progress in Materials Science*. 48 (2003) pp. 57-170 ISSN 0079-6425
 22. Ionbond – Cutting Tools. [online] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ionbond.com/dynasite.cfm?dsid=84846>>
 23. ISCAR ČR s.r.o., Nástroje pro obrábění kovů [online] c2009. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.iscar.cz/>>
 24. Jia, K., Fischer, T.E., and Gallois, B. Microstructure, Hardness and Toughness of Nanostructured and Conventional WC-Co Composites. *Scripta Materialia*. 10 (1998). Pp. 875-891 ISSN 1359-6462
 25. KLEČATSKÝ, Zbyněk. Inovace řezných nástrojů. MM Průmyslové spektrum [online]. 2006, č. 9 [cit. 2009-03-22], s. 28. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/inovace-reznych-nastroju-2-2>>. ISSN 1212-2572.
 26. KLEČATSKÝ, Zbyněk. Inovované řady fréz a vrtáků. MM Průmyslové spektrum [online]. 2006, č. 12 [cit. 2009-03-21], s. 54. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/inovovane-rady-frez-a-vrtaku>>. ISSN 1212-2572.
 27. Kříž, A., Nové trendy vývoje tenkých vrstev vytvořených PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje [online]. [cit. 2009-02-25]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf>
 28. Kříž, A., Tenké vrstvy na řezných nástrojích pro těžkoobrobitelné plasty a vývoj tenkých vrstev aplikovaných na řezných nástrojích [online]. [cit. 2009-02-26], Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz/kriz_kosice.pdf>
 29. Kříž, A., Tenké vrstvy vytvořené PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje [online]. [cit. 2009-02-05] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ateam.zcu.cz/seminar.pdf>>
 30. KYOCERA Corporation [online] c2008. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.kyocera.de/>>

31. LMT Fette spol. s.r.o. – Leitz Metalworking Technology Group [online]
Dostupné na World Wide Web: < <http://www.lmt-tools.com> >
32. Mallika, K., Komanduri, R. Diamond coatings on cemented tungsten carbide tools by low-pressure microwave CVD. *Wear*. 224 (1999) pp. 245-266 ISSN 0043-1648
33. Mitsubishi Materials Corporation Hard Metal Products Department. [online]
Dostupné na World Wide Web:<<http://www.mitsubishicarbide.com>>
34. Musil, J. Hard and superhard nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 125 (2000). pp. 322-330 ISSN 0257-8972
35. Nikl a jeho slitiny, Titan a jeho slitiny, SMA, [online], [cit. 2009-05-05],
Dostupné na World Wide Web:
<http://www.ateam.zcu.cz/download/Nikl_titan-upr.pdf>
36. Nová generace fréz pro vysoké posuvy. MM Průmyslové spektrum [online]. 2009, č. 3 [cit. 2009-04-07], s. 55. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-frez-pro-vysoke-posuvy>>. ISSN 1212-2572.
37. Nová průmyslová technologie povlakování. MM Průmyslové spektrum [online]. 2003, č. 4 [cit. 2009-03-09], s. 48. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-prumyslova-technologie-povlakovani>>. ISSN 1212-2572.
38. Nové řezné nástroje pro výrobu - 2. část. MM Průmyslové spektrum [online]. 2006, č. 7 [cit. 2009-03-11], s. 60. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-rezne-nastroje-pro-vyrobu-2-cast>>. ISSN 1212-2572.
39. Podaný, P., Kříž, A., Předdepoziční procesy tenkých vrstev. *Metal 06*. Hradec nad Moravicí [online], [cit. 2009-03-02], Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz/podany_metal06.pdf>
40. Pramet Tools, s.r.o., [online] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.pramet.com>>
41. PRÁŠIL, Tomáš. Nástroje pro vysokorychlostní a vysokoposuvové frézování. MM Průmyslové spektrum [online]. 2006, č. 12 [cit. 2009-04-05], s. 56. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-vysokorychlostni-a-vysokoposuvove-frezovani>>. ISSN 1212-2572.
42. PRÁŠIL, Tomáš. Nové řezné nástroje. MM Průmyslové spektrum [online]. 2006, č. 10 [cit. 2009-04-05], s. 76. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-rezne-nastroje-2>>. ISSN 1212-2572.
43. Příručka obrábění Pramet. Pramet Tools, s.r.o., [online] [cit. 2009-02-18], Dostupné na World Wide Web: <http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/prirucka_cz.pdf>
44. PVD. Everything is coated. [online] c1995. Dostupné na World Wide Web:< <http://www.pvd-coatings.co.uk/> >
45. SECO TOOLS AB, [online] c2008. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.secotools.com/>>
46. SHM, s.r.o. [online] c2007. Dostupné na World Wide Web:<<http://www.shm-cz.cz/>>
47. Sosnová, M., Hájek, J., Podaný, P., Zetek, M., Beneš, P., Kříž, A., Low Friction Layers, *PhD 2005 – 3th International PhD Conference On*

- Mechanical Engineering*. Srni [online]. [cit. 2009-03-14]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz/PhD_Sosnova.pdf>
48. Sosnová, M., Kříž, A., *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování*. [online]. [cit. 2009-03-10], Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_sosnova.pdf>
49. Sterling Gun Drills, Inc, Deep Hole Gun Drills, Drilling systems. [online] c2009. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sterlinggundrills.com>>
50. Tenké vrstvy - Speciální přednáška pro předmět SMA [online]. [cit. 2009-03-17]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf>
51. Trendy v povlakování slinutých karbidů. MM Průmyslové spektrum [online]. 2001, č. 7 [cit. 2009-02-25], s. 43. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu>>. ISSN 1212-2572.
52. Upadhyaya, G.S., Materials science of cemented carbides - an overview. *Materials & Design* 22 (2001) pp. 483-489. ISSN 0261-3069
53. WINTER servis s.r.o., Hluboké vrtání BOTEK. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.winter-servis.cz>>
54. YesTool Co., Ltd. „One Pass“ Indexable Drilling & Deburring System. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.yestool.co.kr/user/index/np_YTDI_DB.aspx?classId=39&pClassId=1>
55. ZEMČÍK, O. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1.vyd. CERM. s.r.o. Brno: březen 2003, skriptum, ISBN 80-214-2336-6

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
a-C	---	amorfní uhlík
a-C:H	---	amorfní uhlohydrát, amorfní hydrogenovaný uhlík
a_p	mm	šířka záběru ostří
c	m	celková délka centrální trhliny
C_T	---	konstanta
C_V	---	konstanta
CVD	---	chemical vapour deposition (chemické napařování z plynné fáze)
D	mm	průměr díry
DLC	---	diamond like carbon (uhlík podobný diamantu)
d_{WC}	nm	velikost zrna WC
E	MPa	modul pružnosti v tahu
e_c	J.cm ⁻³	měrná energie vrtání
f	mm	posuv na otáčku
F_c	N	řezná síla
FCC	---	face centered cubic (kubická plošně středěná mřížka)
F_f	N	posuvová síla
f_z	mm	posuv na zub
HCP	---	hexagonal closed packed (hexagonální těsně uspořádaná mřížka)
HDLC	---	hydrogenovaný DLC
HFC	---	high feed cutting (vysokoposuvové obrábění)
HRC	MPa	tvrdost dle Rockwella
HV	MPa	tvrdost dle Vickerse
J	mA.cm ⁻²	proudová hustota iontů
KT	mm	hloubka výmolu na čele
KV_y	mm	radiální opotřebení špičky
L	mm	délka
m	---	exponent
M_c	Nm	krouticí (řezný) moment
m_t	g	atomová hmotnost
n	min ⁻¹	otáčky
O_T	---	odolnost vůči tepelným šokům
PKNB	---	polykrystalický kubický nitridu boru
PVD	---	physical vapour deposition (fyzikální napařování)
R	Å.m ⁻¹	rychlost eroze katody
Ra	μm	střední aritmetická úchylna profilu
R_m	MPa	mez pevnosti
S	atomy/iont	výtěžnost naprašování
SK	---	slinutý karbid

T	min	trvanlivost
T_{reak}	°C	teplota, při které probíhá chem. reakce
ta-C	---	tetrahedrální amorfni uhlík
u	m	délka úhlopříčky vtisku
VB	mm	šířka fazetky opotřebení na hřbetě
VBD	---	vyměnitelná břitová destička
v_c	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	řezná rychlost
v_f	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	posuvová rychlost
α	K^{-1}	součinitel délkové roztažnosti
ε_r	°	úhel špičky
κ_r	°	úhel nastavení hlavního ostří
λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost
μ	---	koeficient tření
ρ	$\text{g} \cdot \text{cm}^3$	měrná hmotnost
σ_b	MPa	ohybová pevnost
ν	---	Poissonovo číslo

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Fotografie z průběhu testování šroubových vrtáků

Příloha 1

Fotografie z průběhu testování šroubových vrtáků

