



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

FRÉZY Z RYCHLOŘEZNÝCH OCELÍ S PVD POVLAKY A JEJICH VYUŽITÍ

HIGH-SPEED STEEL MILLS WITH PVD COATINGS AND THEIR USE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK ŽILÁK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ALEŠ JAROŠ

BRNO 2012

ABSTRAKT

Práce s názvem „Frézy z rychlořezných ocelí s PVD povlaky a jejich využití“ se zabývá rozdělením nástrojových materiálů se zaměřením na rychlořeznou ocel. Následně je rozebrána problematika rychlořezných ocelí (jejich rozdělení, vlastnosti a použití, chemické složení a v neposlední řadě tepelné zpracování). Poté je rozebrána charakteristika povlakovacích metod (především metody PVD) a závěr bakalářské práce je zaměřen na typy a vlastnosti povlaků nanášených na frézy z rychlořezných ocelí a jejich využití v současné praxi.

Klíčová slova

frézování, frézy, nástrojový materiál, rychlořezná ocel, PVD povlak

ABSTRACT

This bachelor thesis "Mills from high-speed steel with PVD coatings and their use" deals with tool materials and their distribution (mainly high-speed steel). The problem of high-speed steels is analyzed (their distribution, properties and uses, chemical composition and finally heat treatment). Then the characteristics of the coating methods (mainly PVD) is analyzed. The conclusion of this work is focused on the types of spray coating and the responsibility of the high speed steel mills and their use in current practice.

Keywords

milling, mills, tool materials, high-speed steel, PVD coating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽILÁK, M. *Frézy z rychlořezných ocelí s PVD povlaky a jejich využití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Frézy z rychlořezných ocelí s PVD povlaky a jejich využití** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Marek ŽILÁK

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Aleši Jarošovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 CHARAKTERISTIKA RYCHLOŘEZNÝCH OCELÍ.....	9
1.1 Úvod do nástrojových materiálů.....	9
1.1.1 Volba vhodného nástrojového materiálu	10
1.2 Nástrojové oceli a jejich rozdělení.....	10
1.3 Rychlořezné oceli	11
1.3.1 Rozdělení rychlořezných ocelí.....	11
1.3.2 Vlastnosti a použití některých rychlořezných ocelí	12
1.3.3 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí	13
1.3.4 Chemické složení rychlořezných ocelí	14
2 CHARAKTERISTIKA METODY FRÉZOVÁNÍ	16
2.1 Rozdělení metod frézování	16
2.2 Kinematika frézování.....	17
2.3 Průřez třísky	18
2.4 Rozdělení frézovacích nástrojů.....	18
3 CHARAKTERISTIKA PVLAKOVACÍCH METOD.....	20
3.1 Rozdělení povlakovacích metod	20
3.2 Metoda PVD (Physical Vapour Deposition)	22
3.2.1 Naprašování	23
3.2.2 Napařování.....	23
3.2.3 Iontová implantace.....	24
3.3 Úprava nástrojů před povlakováním.....	24
4 TYPY PVD POVLAKŮ NANÁŠENÝCH NA FRÉZY Z HSS	26
4.1 Vlastnosti PVD povlaků	26
4.2 Typy nanášených povlaků	27
4.3 Nejpoužívanější PVD povlaky.....	28
4.4 Frézovací nástroje ze sortimentu společnosti ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s.....	29
ZÁVĚR	32
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	33
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	35

ÚVOD

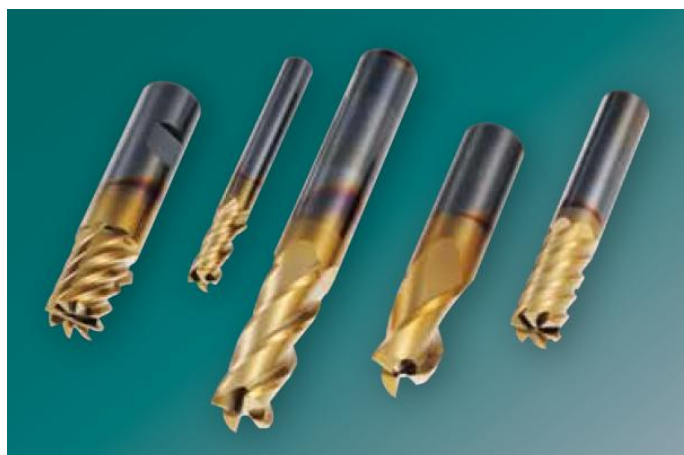
Jelikož jsou v dnešní době kladeny stále větší nároky na zvýšení produktivity obráběcích metod, je důležité již zvolení vhodného nástrojového materiálu, ze kterého se bude nástroj vyrábět. I přestože je na trhu celá řada nástrojových materiálů (od nástrojových ocelí až po přírodní diamant), doposud neexistuje žádný univerzální nástrojový materiál na všechny druhy obráběných povrchů. Proto je vždy důležité pro konkrétní obráběcí nástroj zvolit vhodný nástrojový materiál, který bude splňovat požadované vlastnosti jako jsou tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu, houževnatost apod.. Rychlořezné oceli patří do skupiny nástrojových ocelí a pro své zcela specifické vlastnosti a využitelnost jsou uváděny jako samostatná skupina legovaných nástrojových ocelí pro vysoce výkonné řezné nástroje (např. soustružnické nože, frézy, vrtáky atd.).

Frézování je jedna ze základních obráběcích metod, kdy se pomocí frézy, která koná hlavní (rotační) pohyb, obrábí rovinné a tvarové plochy, pravoúhlá osazení, drážky, tvarová vybrání a zahloubení, vnější a vnitřní závity. Vedlejší (posuvový) pohyb je většinou přímočarý a koná ho obrobek. Z technologického hlediska se v závislosti na aplikovaném nástroji rozlišuje frézování válcové (frézování obvodem) a frézování čelní (frézování čelem) [3,8].

Aby bylo dosaženo vyšší produktivity obrábění, při použití nástrojů z rychlořezné oceli, nanášejí se na tyto nástroje povlaky (neboli tenké vrstvy), které prodlužují jejich životnost a zlepšují jejich fyzikální a mechanické vlastnosti (viz. obr. 1).

Povlakovací metody se rozdělují do dvou základních metod a to na metodu PVD (Physical Vapour Deposition) a CVD (Chemical Vapour Deposition). Používanější metodou je metoda PVD, jelikož probíhá za nižších pracovních teplot a díky tomu nedochází k tepelnému ovlivnění nástroje. Výhodou PVD metody je možnost napovlakování ostrých hran, které by se metodou CVD povlakovaly jen velmi obtížně.

Dnes je na trhu celá řada povlaků rozdílného složení i rozdílných vlastností. Povlaky nanášené na nástroje jsou buď jednovrstvé či multivrstvé. Multivrstvé povlaky mají vyšší odolnost vrstev proti šíření poruch, čímž se zvyšuje výsledná měřená tvrdost vrstvy, užité vlastnosti v aplikacích a je možné je nanášet ve větších tloušťkách než v případě monovrstev.



Obr. 1 Ukázka povlakovaných nástrojů [12].

1 CHARAKTERISTIKA RYCHLOŘEZNÝCH OCELÍ

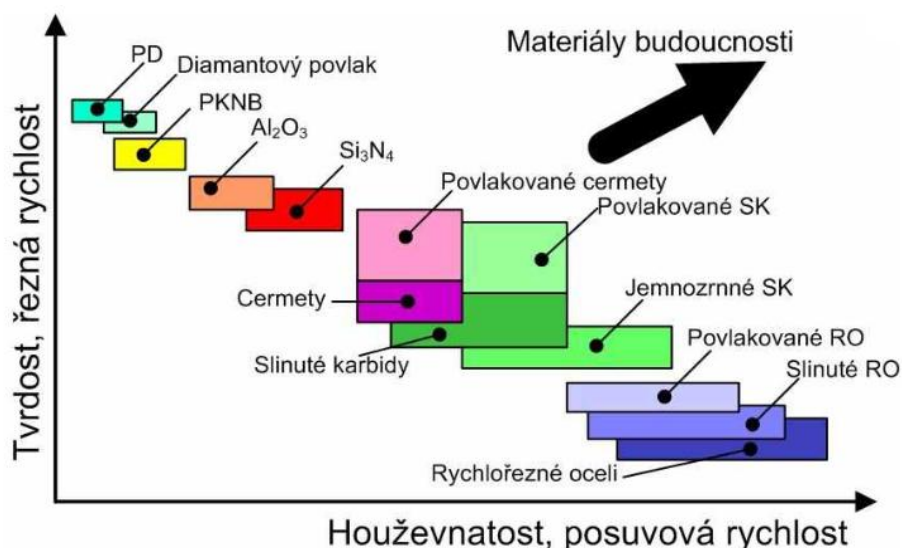
1.1 Úvod do nástrojových materiálů

Průběh a výstupy řezného procesu významně závisí na vlastnostech řezné části nástroje, která je zhotovena z příslušného nástrojového materiálu [3].

Mezi základní požadavky na nástrojový materiál patří jeho **tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu, houževnatost apod.** Všechny uvedené vlastnosti by měl nástrojový materiál splňovat při vyšších a vysokých teplotách po dostatečně dlouhou dobu. Jedná se především o požadavek vysoké řezivosti, a tím i vysokého řezného výkonu, kvantifikovaném velkým minutovým úběrem obráběcího materiálu a dále vysoké odolnosti proti mechanickým a teplotním rázům pro všechny kategorie řezných nástrojů [1,3].

Nástrojové materiály používané pro výrobu řezných částí nástrojů se dělí na (viz. obr. 2):

- nástrojové oceli (uhlíkové) nelegované,
- nástrojové oceli (nízkolegované, střednělegované) legované,
- rychlořezné oceli (HSS),
- stellity,
- slinuté karbidy (SK),
- cermety,
- keramické nástrojové materiály (KM),
- polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB),
- polykrystalický diamant (PKD),
- přírodní diamant [1].



Obr. 2 Přehled nástrojových materiálů, dlouhodobý vývojový trend [11].

1.1.1 Volba vhodného nástrojového materiálu

Každý řezný materiál je vhodný zpravidla pro určité aplikace, protože neexistuje žádný univerzální řezný materiál pro všechny obráběné materiály. I přesto lze říct, že se produktivita obrábění přibližně každých 20 let ztrojnásobuje. Důkazem rostoucí produktivity obrábění je i to, že čas výroby podobného kusu na počátku a konci 20. století dosáhl redukce ze 100 minut obrábění na 1 minutu obrábění [2].

Materiál nástroje, jeho geometrie, rozměry a další parametry musí splňovat vysoké požadavky a jeho výběr záleží zejména na:

- rozměrech obrobku, jeho tvaru, druhu obráběného materiálu, sériovosti výroby,
- technologii výroby polotovaru, stavu povrchové kůry, druhu vměstků, jejich distribuci,
- tvaru a druhu řezu – řez plynulý nebo přerušovaný, podmínkách chlazení a mazání,
- obráběcím stroji – druhu, fyzickému stavu, jeho ekonomické provozní náročnosti,
- finanční náročnosti řezného materiálu, nákladů na jeho provoz a údržbu,
- odolnosti proti opotřebení – fyzikálnímu i chemickému, zvláště zatížení za tepla,
- požadavcích na kvalitu obrobeného povrchu,
- požadavcích na spolehlivost, bezpečnost a ekologii obráběcího provozu,
- možnosti recyklace nebo likvidace bezpečné likvidace opotřebovaného nástroje [2].

1.2 Nástrojové oceli a jejich rozdělení

Na nástrojové oceli jsou kladeny vysoké a často protichůdné požadavky. U některých nástrojů je vyžadována vysoká tvrdost a pevnost, ale u jiných se naopak mechanické vlastnosti snižují, aby se získala potřebná houževnatost. U nástrojů, které pracují za zvýšených teplot, musí být zachovány mechanické vlastnosti i za těchto zvýšených teplot. U všech nástrojů je důležité, aby byly vysoce odolné proti abrazivnímu a adhezivnímu opotřebení a u některých i za zvýšených teplot. Nástrojové oceli musí mít taky vyšší čistotu tj. nižší obsah vměstků a rovnoměrně rozložené karbidy v matrici, aby se snížilo nebezpečí praskání nástrojů při kalení a vylamování břitů za provozu. Někdy je taky požadována odolnost proti korozi. Na nástroje, které mají mít vysokou tvrdost, ale také dostatečnou houževnatost se používají nelegované popř. nízkolegované cementační oceli nebo se provádí speciální tepelné zpracování [4].

Nástrojové oceli se dělí podle řady metodik (např. dle druhu ochlazovacího prostředí, způsobu použití atd.), ale nejčastěji se dělí dle chemického složení na:

- nástrojové oceli (uhlíkové) nelegované,
- nástrojové oceli (nízkolegované, střednělegované) legované,
- rychlořezné oceli (vysokolegované) [1,2].

Tab. 1 Přehled nástrojových ocelí [2].

Nástrojové oceli	nelegované (uhlíkové)	legované (nízko, středně a vysokolegované)	rychlořezné
Označení dle ČSN	19 0xx-19 2xx	19 3xx-19 7xx	19 8xx
Obsah uhlíku (%)	0,3-0,4	0,8-1,2	0,7-1,3
Obsah legur (%)	do 1%	10-15	více než 30%
Legury	Mn, Cr, Si	Cr, W, Mo, V, Mn, Si, Ni	W, Mo, Cr, V, Co
Kalící prostředí	voda	olej	solná lázeň, vzduch, vakuum (i tekutý dusík)
Dosažitelná tvrdost (HRC)	62-64	66	64-68
Typické aplikace	ruční nářadí – čepele, sekáče, pilníky, pilky na kov	strojní nářadí pro nízké řezné rychlosti (do 25 m/min) – vrtáky, frézy, revolverové nože, protahovací trny	strojní nástroje pro řezné rychlosti (do 40 m/min) – vrtáky, frézy, výhružníky, výstružníky, závitníky

1.3 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli jsou pro své zcela specifické vlastnosti a využitelnost uváděny jako samostatná skupina legovaných nástrojových ocelí pro vysocevýkonné řezné nástroje. Obsahují karbidotvorné prvky W, Cr, V, Mo a nekarbidotvorný Co. Rychlořezné oceli zpravidla obsahují méně než 1% uhlíku. Podle obsahu legujících prvků a vlastností jsou vhodné pro řezné nástroje na obrábění ocelí, ocelí na odlitky o vysoké pevnosti a tvrdosti a těžkoobrobitelných materiálů, ale také se hojně používají pro obrábění dřeva atd. [3].

Vysokolegované rychlořezné oceli jsou charakteristické střední odolností proti opotřebení, vysokou lomovou pevností, které jim dávají široké pole uplatnění. Tyto oceli snášejí při obrábění teplotu přibližně až 600 °C. Proto jsou používány pro výkonné řezné nástroje vystavené nárazům při přerušovaném řezu, jako jsou frézy, vrtáky, závitorezné nástroje, tvarové nástroje, výstružníky a další. Pro nástroje z rychlořezných ocelí je ekonomicky vhodné používání sice poněkud dražších, ale na druhou stranu mnohem kvalitnějších druhů vysokolegovaných rychlořezných ocelí. Aby bylo využití nástrojů z rychlořezných ocelí optimální, je důležité použít vhodnou procesní kapalinu, která si klade za účel ochlazovat nástroj v místě řezu, důležitý je i mazací účinek [1,3].

1.3.1 Rozdělení rychlořezných ocelí

Dle zařazení v ČSN se rychlořezné oceli rozdělují do tří skupin:

- **oceli s vysokým výkonem** (zn. 19 850, 19 851, 19 852, 19 855, 19 856, 19 857, 19 858, 19 859, 19 860, 19 861) – oceli zařazené do této skupiny mají koeficient řezivosti $K = 1,3$. Kromě základních legovacích prvků mají ještě přísadu 5 až 10 % kobaltu (některé mají zvýšen obsah uhlíku a vanadu). Oceli s vysokým výkonem jsou vhodné na řezné nástroje jejichž pracovní břit se zahřívá na teplotu 640 až 650 °C a používají se na obrábění materiálů o vysoké pevnosti nebo houževnatosti (pro obrábění běžných materiálů vysokými rychlostmi),
- **oceli výkonné** (zn. 19 802, 19 810, 19 829, 19 830) – oceli zařazené do této skupiny mají koeficient řezivosti $K = 1,0 - 1,3$ a patří do ní oceli s obsahem 10% wolframu a 2% vanadu (zn. 19 802) a wolfram-molybden-vanadové oceli (19 829 a 19 830).

Oceli této skupiny jsou vhodné k obrábění materiálů s pevností asi 900 MPa při průměrných řezných rychlostech (pokud se žádá zvýšená řezivost),

- **oceli pro běžné použití** (zn. 19 800, 19 813, 19 820, 19 824) – oceli zařazené do této skupiny mají koeficient řezivosti $K < 1$ a používají se na nástroje pro obrábění průměrnou rychlostí materiálů s max. pevností 850 MPa [4].

1.3.2 Vlastnosti a použití některých rychlořezných ocelí

Tab. 2 Vlastnosti a doporučené použití rychlořezných ocelí [2].

Skupina	Třída	Vlastnosti	Použití
Pro běžné výkony	19 820	Velká tvrdost a houževnatost, zvětšená odolnost proti opotřebení.	Nástroje pro běžné použití při menším tepelném namáhání.
Výkonné	19 802	Vysoká houževnatost, dobrá odolnost proti opotřebení, snadná obrobiteľnosť a obrusiteľnosť.	Značně namáhané nástroje pro obrábění materiálů nižší a střední pevnosti.
	19 810	Zvlášť vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká odolnost proti popouštění, nízká houževnatost, špatná obrusiteľnosť.	Nástroje pro jemné obrábění, obrábění abrazivních materiálů.
	19 829	Vyšší tvrdost, odolnost proti opotřebení, menší houževnatost.	Pro obrábění při zvětšeném tepelném namáhání. Značně namáhané nástroje pro obrábění materiálů střední pevnosti i přerušovaným řezem.
	19 830	Nejvyšší houževnatost, vysoká odolnost proti opotřebení, dobrá obrusiteľnosť.	
Vysoce výkonné	19 850	Velká tvrdost a odolnost proti popouštění, dobrá houževnatost, vysoká řezivost.	Nejvíce namáhané nástroje na těžkoobrobitelné, houževnaté a velmi pevné materiály, v nejnáročnějších řezných podmínkách.
	19 851	Velmi vysoká tvrdost, menší houževnatost.	Obrábění nepřerušovaným řezem, na pevné materiály.
	19 852	Vyšší odolnost proti opotřebení, dobrá houževnatost.	Obrábění vysokými rychlostmi nebo materiálů vysoké pevnosti.
	19 855	Velká odolnost proti popouštění a opotřebení.	Představuje doplňkový sortiment na nástroje na kovy.
	19 856	Velmi vysoká odolnost proti popouštění, nižší houževnatost.	Obrábění těžkoobrobitelných materiálů vysokými rychlostmi.
	19 857	Velmi vysoká odolnost proti opotřebení, nižší houževnatost.	Nejvíce namáhané nástroje, pro obrábění pevných materiálů.
	19 861	Vysoká odolnost proti opotřebení, dobrá houževnatost, zhoršená obrusiteľnosť.	Nejvíce namáhané nástroje pro obrábění při požadavku na vysokou odolnost opotřebení.

1.3.3 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí

Výslednou řezivost a mechanické vlastnosti získávají rychlořezné oceli kalením a popouštěním, následně se ke zlepšení obrobitelnosti žihají na měkko (viz. obr. 3). Kromě těchto běžných způsobů tepelného zpracování jsou známy ještě pochody nazývané jako neúplný izometrický rozpad austenitu a presferoidizace [4].

Žihání na snížení pnutí

Účelem žihání je snížit pnutí, které vzniká v průběhu obrábění nebo tváření za studena. Aby se zamezilo uvolňování pnutí až během ohřevu ke kalení, zařazuje se do technologického postupu výroby nástroje po hrubování, před vlastním dohotovením nástroje (mezioperační žihání). Nejčastěji se provádí při teplotách v rozmezí 600 až 650 °C po dobu asi 1 hodiny s následným pomalým ochlazením na vzduchu [4,7].

Kalení

Kalením se rozumí ohřev na teplotu austenitizace, po které následuje rychlé ochlazení pod teplotu počátku vzniku martenzitu. Teplota austenitizace se volí tak, aby došlo k uvedení přiměřeného množství karbidů do roztoku a tím dojde k obohacení austenitu uhlíkem a dalšími prvky, které se na tvorbě karbidů podílely. Jelikož je uvedení karbidů do roztoku též funkcí času, je nutná i prodleva na teplotě austenitizace (kalicí teplotě). Ochlazení se provádí v doporučeném prostředí, rychlostí, při kterém se co největší množství austenitu přemění na martenzit. Jelikož přeměna na austenit nebývá úplná, proto je nutno počítat s tzv. zbytkovým austenitem [4,7].

Ohřev na kalicí teplotu má být pozvolný a rovnoměrný, proto se u HSS provádí ve více teplotních stupních. Aby se zabránilo zokujení a oduhličení je výhodné provádět ohřev ve vakuu. U HSS se první ohřev provádí při teplotách 500 – 550 °C, druhý při teplotách 850 °C a třetí při 1050 °C, kdy se doby na vyrovnání teplot volí přibližně 0,5 min. na 1 mm tloušťky ohřívajícího nástroje pro předehřev do 650 °C a asi 1 minutu na 1 mm tloušťky při předehřevu na 850 – 900 °C. Po dosažení kalicí teploty v celém průřezu se musí provést prodleva na této teplotě. U rychlořezných ocelí jsou tyto teploty díky vysokým kalicím teplotám poměrně krátké (< 10 - 15 min.). Rychlost ohřevu závisí na průřezu nástroje, výši předehřívací a kalicí teploty a použitém zařízení pro ohřev. Po této prodlevě na kalicí teplotě následuje ochlazení v prostředí, jehož volba závisí na druhu oceli, velikosti a tvaru nástroje. Nejběžnější ochlazovací prostředí jsou voda, olej, solná lázeň nebo vzduch (každé umožňuje jinou ochlazovací rychlost). Jelikož na rychlosti ochlazování z kalicí teploty závisí konečná tvrdost daná vznikem martenzitu, musí se nastavit rychlost ochlazování použitím vhodného ochlazovacího prostředí pro daný druh oceli, rozměr a tvar kaleného předmětu [4,7].

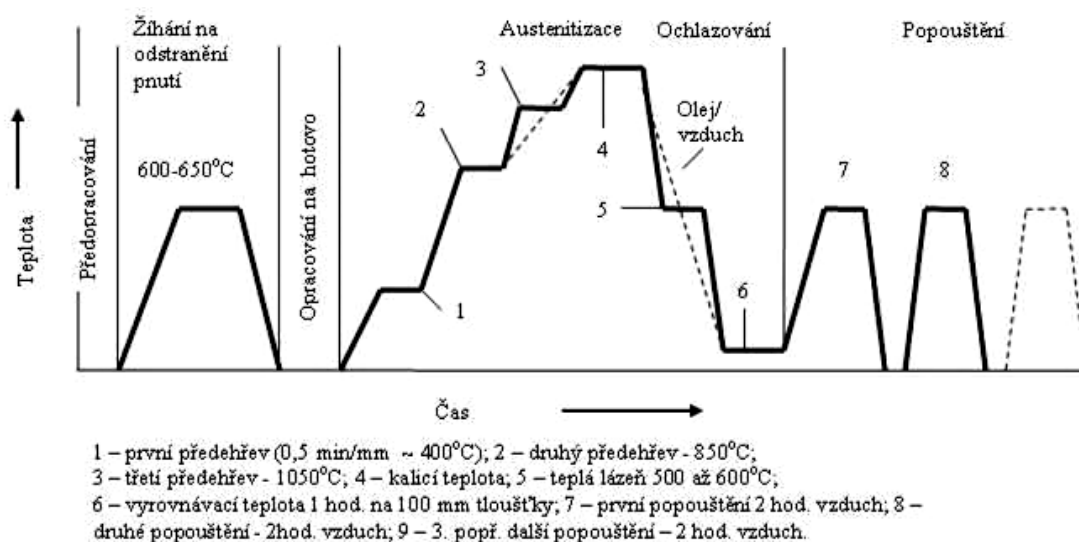
Popouštění

Jelikož jsou nástroje po kalení křehké a náchylné k praskání, musí se bezprostředně po kalení popouštět. Výše popouštěcí teploty se volí podle požadované tvrdosti (resp. pevnosti).

Doporučené teploty popouštění jsou pro jednotlivé druhy ocelí rozdílné. Při popouštění za teplot vyšších než 300 °C je nutné nástroje předehřát asi na 300 až 350 °C. Po vyrovnání teplot pak dále ohřívat rychlostí 20 až 50 °C za hodinu. Popouští-li se v solných lázních, přenese se předehřátý nástroj do solné lázně zahřáté na teplotu popouštění. Doba výdrže na

popouštěcí teplotě do 300 °C by měla být minimálně 1 hodinu. Při vyšších popouštěcích teplotách asi 1 hodina na každých 20 až 25 mm tloušťky, minimálně ale 2 hodiny.

Rychlořezné oceli se popouštějí minimálně třikrát a rychlořezné oceli legované kobalem i více jak třikrát. Při vícenásobném popouštění je prodleva na teplotě asi 2 hodiny. Teplota druhého a dalších popouštění je asi o 10 °C nižší než předchozích. Násobným popouštěním se docílí dokonalějšího rozpadu zbytkového austenitu a zároveň popouštění martenzitu, který se rozpadem zbytkového austenitu tvoří [4,7].



Obr. 3 Průběh tepelného zpracování [7].

1.3.4 Chemické složení rychlořezných ocelí

Uhlík (C)

Dnešní rychlořezné oceli mají obsah uhlíku v rozmezí mezi 0,65 až 1,5%. Uhlík v rychlořezných ocelích ovlivňuje řezivost, jejich mechanické vlastnosti a tepelné zpracování. Při vyšším obsahu se snižuje houževnatost, plastické vlastnosti a tepelná vodivost [4,5].

Optimální obsah uhlíku při určitém obsahu legujících prvků lze určit ze vztahu (1).

$$\%C = \frac{1}{30} \cdot (\%W + 1,9\% Mo + 6,3\% V) \quad (1)$$

Chrom (Cr)

V litém stavu je část chromu rozpuštěna v základní matici a část tvoří karbid $M_{23}C_6$, ve kterém je rozpuštěno i malé množství W, Fe, Mo a V. Tento karbid se při austenizaci zcela rozpouští. Obsah chromu v ocelích bývá okolo 4%. Rozpuštěný chrom zvyšuje prokalitelnost [4].

Wolfram (W)

Wolfram je základním legovacím prvkem rychlořezných ocelí. Jeho obsah bývá 5 až 20% a ve struktuře oceli vytváří s uhlíkem sloučeninu tzv. karbid wolframu, který je velmi tvrdý a odolný proti otěru [4,5,6].

Molybden (Mo)

Molybden v rychlořezných ocelích nahrazuje buď zcela nebo jen z části wolfram. Vlastnosti rychlořezných ocelí ovlivňuje podobně jako wolfram. Molybdenové rychlořezné oceli však mají vyšší houževnatost a díky tomu jsou vhodné především na nástroje pracující s přerušovaným řezem [4].

Vanad (V)

Obsah vanadu se volí v rychlořezných ocelích podle obsahu wolframu a uhlíku, většinou 1 – 4%. V oceli tvoří s uhlíkem samostatné karbidy o velmi vysoké tvrdosti, které účinně zvyšují řezivost a odolnost proti otěru. Zvyšuje prokalitelnost a především odolnost proti popouštění. Při malém obsahu zvyšuje jemnozrnnost oceli, a tím příznivě ovlivňuje houževnatost [4,5].

Kobalt (Co)

Kobalt v ocelích netvoří karbidy. Po zakalení je 97 – 98% kobaltu rozpuštěno v základní matici a zbytek je v karbidech. Nejvýkonnější oceli obsahují přísadu 5 – 10% kobaltu. V rychlořezných ocelích zvyšuje velmi značně odolnost proti popouštění [4,5,6].

Tab. 3 Přehled a složení vybraných druhů rychlořezných ocelí [2].

Druh rychlořezné oceli	ČSN	Složení					
		C	Cr	W	Mo	V	Co
18% W	19 855	0,70	4,2	18,0		1,5	4,8
	19 859	0,70	4,2	18,0		1,75	9,5
	19 860	0,75	4,2	18,0	0,7	1,6	9,5
10% W	19 856	0,95	4,2	10,2		2,35	5,0
	19 857	0,95	4,2	10,2		2,35	9,8
W + Mo	19 850	0,95	4,2	5,8	5,0	2,0	8,0
	19 852	0,85	4,2	6,2	4,8	1,85	5,0
W + Mo	19 858	1,35	4,4	12,0		4,25	5,0
W + Mo + V	19 861	1,25	4,1	10,2	3,8	3,3	10,5

Nové označování nástrojové oceli třídy 19 dle normy EU je zcela odlišné a zohledňuje obsah legur. Kdy rychlořezná ocel 19 861 (ČSN 41 9861) je v rámci norem EU označena jako:

HS 10-4-3-10

kde: HS – rychlořezná ocel (High Speed)

10 – 10% W

4 – 4% Mo

3 – 3% V

10 – 10% C

2 CHARAKTERISTIKA METODY FRÉZOVÁNÍ

Frézování je jedna ze základních obráběcích metod, při které je materiál obrobku odebírán vícebřitým nástrojem. U všech druhů frézování koná hlavní (rotační) pohyb nástroj, posuvový pohyb je většinou přímočarý a koná ho obrobek, u okružního a planetového frézování může být i rotační a konat ho může obrobek nebo nástroj. U moderních frézovacích strojů jsou posuvové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky [3,9].

Frézováním lze vyrábět:

- rovinné plochy,
- tvarové plochy,
- pravouhlá osazení,
- drážky (stopkovou, kotoučovou nebo čelní válcovou frézou),
- tvarová vybrání a zahloubení,
- vnější a vnitřní závity [9].

2.1 Rozdělení metod frézování

Z technologického hlediska se v závislosti na aplikovaném nástroji rozlišuje **frézování válcové (frézování obvodem)** a **frézování čelní (frézování čelem)** (viz. obr. 4). Od těchto základních způsobů se odvozují některé další způsoby, jako je frézování okružní (vnější a vnitřní) a planetové (vnější a vnitřní) [3,9].

Válcové frézování je převážně uplatňováno při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu, kdy obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se frézování dělí na nesousledné (protisměrné, sousměrné) a sousledné (sousměrné) [9].

Při nesousledném frézování rotuje nástroj proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění během frézování z nulové hodnoty na hodnotu maximální. V okamžiku nulové tloušťky třísky nedochází k jejímu oddělování, ale až po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Přitom vznikají silové účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení břitu. Při nesousledném frézování má řezná síla složku, která působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu stroje [3,9].

Výhody nesousledného frézování:

- trvanlivost nástroje nezávisí na okujích, písčitém povrchu obrobku apod.,
- není zapotřebí vymezování vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje,
- menší opotřebení šroubu a matice,
- záběr zubů frézy při jejich vřezávání nezávisí na hloubce řezu [3,9].

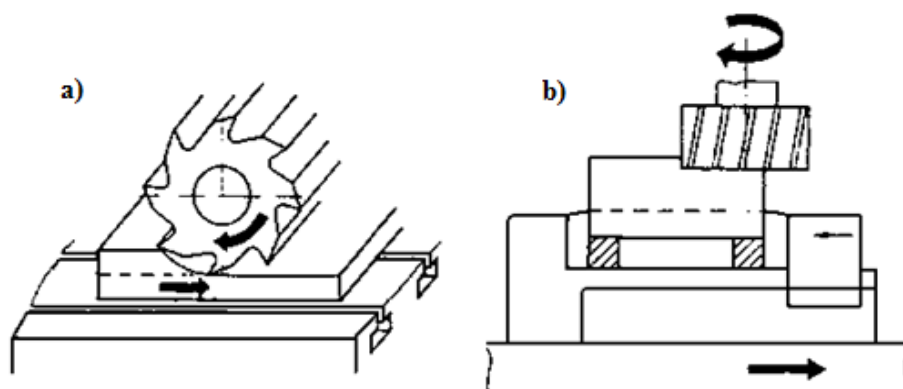
Při sousledném frézování rotuje nástroj ve směru posuvu obrobku. Při vnikání zubu frézy do obrobku vzniká maximální tloušťka třísky, obrobená plocha se vytváří, když zub vyjíždí ze záběru. Řezné síly působí obvykle směrem dolů, proti stolu stroje. Sousledné frézování může probíhat pouze na přizpůsobeném stroji, při vymezené vůli a předpětí mezi

posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. V opačném případě způsobuje vůle nestejný posuv, při němž může dojít k poškození nástroje, popř. i stroje [3,9].

Výhody sousledného frézování:

- vyšší trvanlivost břitů, což umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a posuvů,
- menší potřebný řezný výkon,
- řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu, takže lze použít jednodušších upínacích přípravků,
- menší sklon ke kmitání,
- obvykle menší sklon k tvoření nárůstku,
- menší drsnost obrobeného povrchu [3,9].

Čelní frézování se uplatňuje při práci s čelními frézami. Čelní frézy mají břity vytvořeny na obvodě i čele nástroje. Podle polohy osy frézy vzhledem k frézované ploše se rozlišuje symetrické (osa nástroje prochází středem frézované plochy) a nesymetrické frézování (osa nástroje je mimo střed frézované plochy). U čelního frézování pracuje fréza současně sousledně i nesousledně [9].



Obr. 4 Kinematika frézování a) válcového frézování, b) čelního frézování [19].

2.2 Kinematika frézování

Hlavní pohyb je při frézování definován řeznou rychlostí v_c , která je dána vztahem (2).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2)$$

Vedlejší pohyb v_f závisí na druhu frézy, hodnotě posuvu na zub f_z , počtu zubů z a je dán vztahem (3).

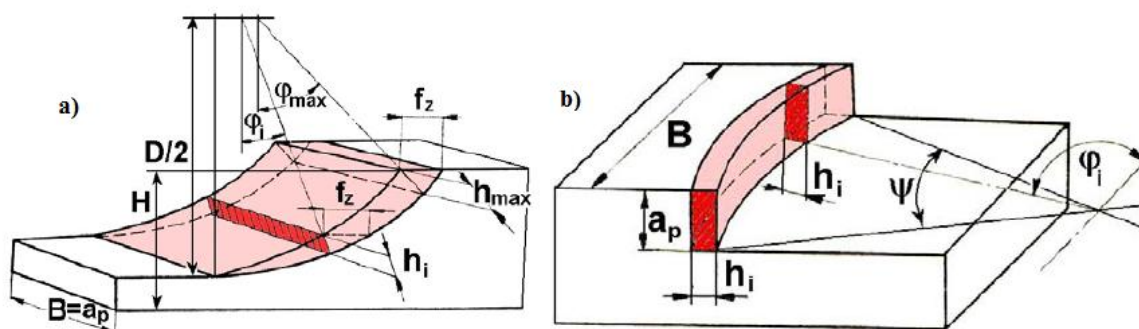
$$v_f = \frac{f_z \cdot z \cdot n}{1000} \quad (3)$$

Jejich vektorový součet (vztah 4) pak udává efektivní výsledný pohyb v_e ve skalárním vyjádření.

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (4)$$

2.3 Průřez třísky

Tloušťka odřezávané třísky se při válcovém nesousledném frézování mění od nulové do maximální hodnoty a od maximální hodnoty do nuly při frézování sousledném (viz. obr. 5) [1,3].



Obr. 5 Průřez třísky a) válcové frézování, b) čelní frézování [24].

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} se vyjádří vztahem (5).

$$A_{Di} = h_i \cdot a_p = f_z \cdot a_p \cdot \sin \phi_i \quad (5)$$

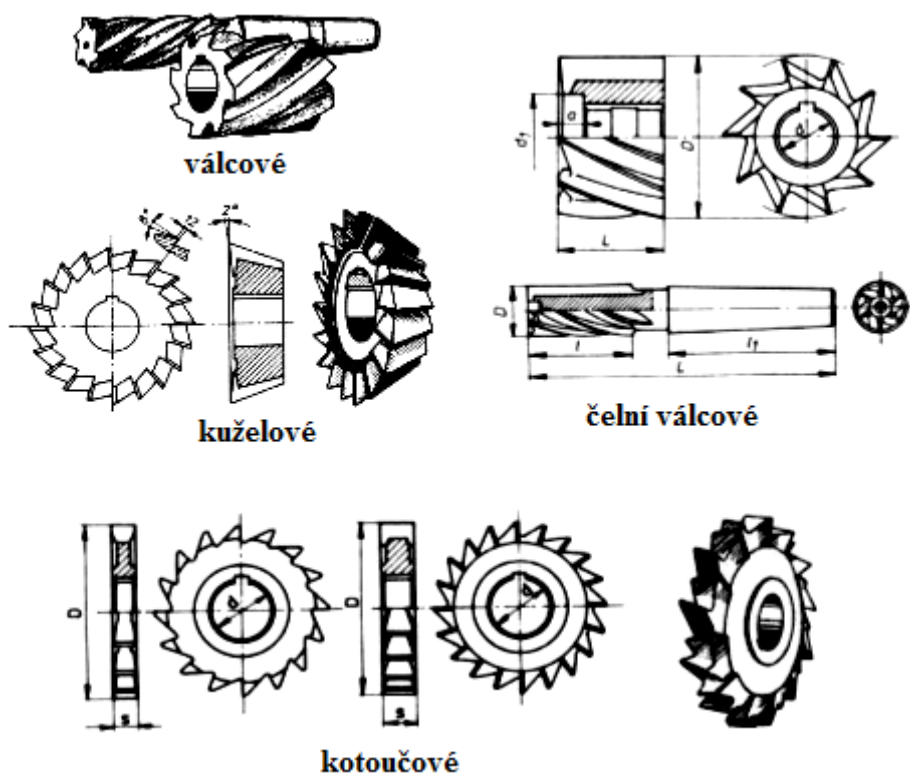
2.4 Rozdělení frézovacích nástrojů

Vzhledem k mnohostrannému uplatnění frézování ve strojírenské výrobě a k velkému rozsahu technologie frézování se v současné době používá mnoho typů fréz (viz. obr. 6). Frézy jsou vícebřité, někdy i tvarově složité nástroje, které lze v závislosti na jejich technologickém uplatnění třídit do jednotlivých skupin podle různých hledisek:

- podle umístění zubů na tělese nástroje frézy se dělí na válcové (mající zuby na válcové ploše), čelní (mající zuby na čelní ploše), válcové čelní (mající zuby na čelní a válcové ploše),
- podle nástrojového materiálu zubů se rozlišují frézy z rychlořezných ocelí, slinutých karbidů, cermetů, řezné keramiky, polykrystalického kubického nitridu boru a polykrystalického diamantu,
- podle provedení zubů se frézy dělí na frézy se zuby frézovanými nebo podsoustruženými,
- podle směru zubů, vzhledem k ose rotace, se frézy dělí na frézy se zuby přímými a zuby ve šroubovici pravé nebo levé,
- podle počtu zubů vzhledem k průměru frézy se dělí na jemnozubé, polohrubozubé a hrubozubé,

- podle konstrukčního uspořádání se rozlišují frézy na frézy celistvé, s vloženými noži a na frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami (mechanicky upevněnými k tělesu frézy),
- podle geometrického tvaru funkční části frézy se dělí na válcové, kotoučové, úhlové, drážkovací, kopírovací, rádiusové, na výrobu ozubení, závitů, atd.,
- podle způsobu upnutí se dělí na frézy nástrčné (upínají se za centrální díru) a stopkové (upínají se za válcovou nebo kuželovou stopku),
- podle smyslu otáčení se frézy dělí na pravořezné a levořezné.

Stejně jako soustružnické nože i frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami označovány jednotným systémem ISO, který používá převážná většina výrobců nástrojů a nástrojových materiálů [3,9].

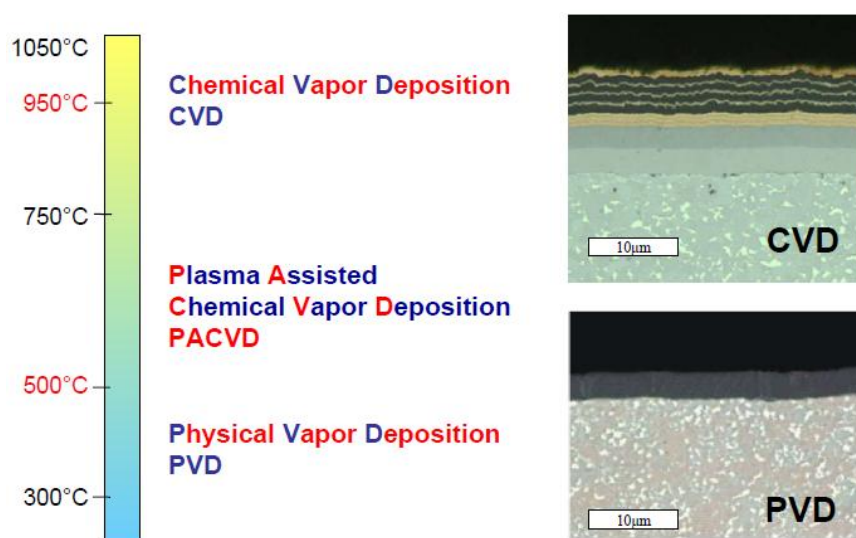


Obr. 6 Druhy fréz [21].

3 CHARAKTERISTIKA POVLAKOVACÍCH METOD

3.1 Rozdělení povlakovacích metod

Povlakované rychlořezné oceli jsou vyráběny tak, že se na podkladový materiál nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení (viz. obr. 7). Tento povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost, než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě. Tyto výhodné vlastnosti jsou dány tím, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitosti, méně strukturních defektů a tvoří bariéru proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje. Vlastnosti povrchové vrstvy povlaku se výrazně podílejí na zamezování tvorby nárůstku na břitu nástroje [11].



Obr. 7 Teplotní rozdělení povlakovacích metod [14].

Metody povlakování se rozdělují do dvou základních skupin:

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition)

Jedná se o fyzikální metodu napařování (viz. obr. 8), která je charakteristická nízkými pracovními teplotami (pod 500 °C). Tato metoda byla vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí (jelikož nízká teplota zaručuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění nástroje). V dnešní době dochází k významnému rozvoji této metody povlakování a rozšiřování její aplikace také pro slinuté karbidy [11,13,14].

Nejčastější způsoby vytváření PVD povlaku jsou:

- napařování,
- naprašování,
- iontová implantace [11,13,14].

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition)

Jedná se o chemickou metodu napařování z plynné fáze (viz. obr. 8), která probíhá za vysokých teplot (700 – 1500 °C). Tato metoda je hlavní metodou povlakování slinutých karbidů [11,13,14].

Nejčastější způsoby vytváření CVD povlaku jsou:

- tepelně indukovaná,
- plazmaticky aktivovaná,
- elektronově indukovaná (paprskem elektronů),
- fotonově indukovaná (laserem) [11,13,14].

Výhody metody CVD

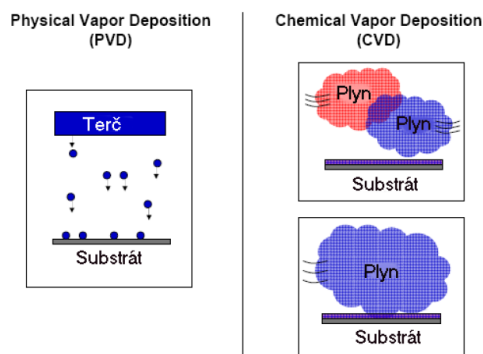
- vysoká hustota povlaku a vysoká teplotní stabilita povlaku
- vynikající adheze k podkladovému materiálu,
- ekonomická výhodnost tvorby silných vrstev povlaků,
- rovnoměrná tloušťka povlaku u tvarově složitých nástrojů a součástí,
- možnost vytvářet poměrně složité vrstvy a to nejen nitridů kovů,
- relativně nízké pořizovací i provozní náklady [11,14].

Nevýhody metody CVD

- vysoké pracovní teploty a vysoká energetická náročnost,
- nelze povlakovat ostré hrany,
- tahová napětí ve vrstvě,
- dlouhý pracovní cyklus 8 – 10 hodin,
- ekologicky nevyhovující pracovní plynné směsi [11,14].

Kvalitativní změnu v technologii vytváření otěruvzdorných povlaků přinesly tzv. plazmaticky aktivované CVD metody (PCVD, PACVD, PECVD atd.), které se od klasických CVD vyznačují nízkými pracovními teplotami, přičemž se nemění její princip (vytváření povlaku z plynné fáze) [11].

Další metoda, která je založena na principu snížení pracovních teplot metody CVD je metoda MTCVD (Middle Temperature CVD). Výhodou metody je, že umožňuje nanášet povlaky z plynné fáze za podstatně nižších teplot (700 – 850 °C) [11].

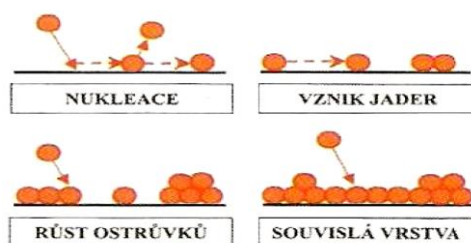


Obr. 8 Způsob přípravy vrstvy z pevného terče u PVD metody a z plynu u CVD [14].

3.2 Metoda PVD (Physical Vapour Deposition)

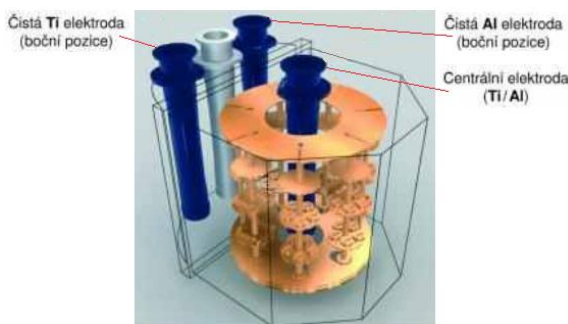
Při metodě PVD jsou povlaky vytvářeny za sníženého tlaku (0,1 – 1,0 Pa) kondenzací částic (atomů), které jsou fyzikálními metodami rozprašováním nebo odpařováním uvolňovány ze zdroje částic (terčů). Tyto uvolněné částice jsou ionizovány a reagují s atmosférou komory, kterou tvoří interní a reaktivní plyn (např. Ar a N₂) a záporným předpětím jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde se usazují ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku (1 – 5 μm) [11,13,14].

Vrstva povlaku je vytvářena z jednotlivých dopadajících atomů (viz. obr. 9). Atomy jsou nejdříve zachyceny procesy sorpce, pohybují se po povrchu a potom jsou buď zachyceny trvalou vazbou, nebo zpětně uvolněny. Další dopadající atomy se díky pohyblivosti po povrchu mohou spojit vazbou s dříve zachycenými atomy a postupně tak vytvářet izolované zárodky (jádra) a ostrůvky rostoucí vrstvy. Ty se potom spojují, až vytvoří souvislou vrstvu, která dále roste a zvětšuje svou tloušťku [11,13,14].



Obr. 9 Způsob přípravy vrstvy z pevného terče u PVD metody a z plynu u CVD [14].

K nevýhodám PVD metod patří složitý vakuový systém a požadavek na pohyb povlakovaných předmětů, aby došlo k rovnoměrnému nanesení povlaku po celém jejich povrchu (viz. obr. 10). Naopak mezi výhody patří možnost povlakování ostrých hran [11].



Obr. 10 Uspořádání povlakovací komory [23].

Nejčastější způsoby vytváření PVD povlaku jsou:

- napařování (evaporation) – přímé, reaktivní, aktivní reaktivní, s asistencí iontového paprsku,
- naprašování (sputtering) – doutnavý výboj (stejnoseměrná nebo RF dioda, trioda, magnetron), iontový paprsek (jediný, dvojité),
- iontová implantace (ion-plating) – doutnavý výboj (stejnoseměrná nebo RF dioda, trioda, výboj v duté katodě, naprašování), iontový paprsek (přímý iontový paprsek, iontový paprsek, skupinový iontový paprsek) [11,13,14].

3.2.1 Naprašování

Naprašování je depozice částic oddělených z povrchu zdroje (terče) fyzikálním odprašovacím procesem. Obvykle probíhá ve vakuu nebo při nízkém tlaku plynu ($< 0,7\text{Pa}$), kdy se odprašené částice dostanou na povrch substrátu bez kolize s molekulami plynu, v prostoru mezi zdrojem a substrátem. Naprašování může být prováděno i při vyšším tlaku ($0,7 - 2,0\text{ Pa}$) [11,14].

Touto metodou lze vytvářet tenké povlaky z těžkovitelných materiálů bez požadavku ohřevu terče na vysokou teplotu, která je potřebná při odpařovacím procesu [11,14].

Systémy naprašování

- doutnavým výbojem,
- magnetovým naprašováním,
- radiofrekvenčním naprašováním,
- naprašováním iontovým paprskem [11,13,14].

Výhody naprašování

- velmi nízké zatížení tepelnou radiací,
- terč a substrát mohou být umístěny blízko vedle sebe,
- lze odprašovat a ukládat prvky, slitiny a chemické sloučeniny,
- odprašovaný terč je stabilním zdrojem par a má vysokou životnost atd. [11].

Nevýhody naprašování

- je nutné pohyblivé upevnění substrátu,
- intenzita naprašování je ve srovnání s intenzitou tepelného odpařování nízká,
- většina energie dopadající na terč se mění na teplo, které se musí odvádět,
- terče jsou často drahé, využití materiálu je špatné,
- velké vnitřní napětí v povlaku [11].

3.2.2 Napařování

Napařování je metoda povlakování, při které je materiál odpařován z terčů, které jsou různými způsoby ohřívány. Substrát může být ohříván popř. připojen na požadované předpětí použitím stejnosměrného nebo střídavého napětí. Napařování probíhá ve vakuu při tlaku ($10^{-3} - 10^{-8}\text{ Pa}$). Pro vytvoření povlaku s rovnoměrnou tloušťkou je do komory přiváděn odpovídající plyn (např. Ar) pod tlakem $0,7 - 26,7\text{ Pa}$ (dochází k vícenásobným srážkám při transportu odpařené složky na substrát) [11,13,14].

Odpařovací zdroje dle způsobu ohřevu

- odporové,
- indukční,
- obloukové,
- elektronovým paprskem,
- laserové [11,14].

Při laserem indukovaném odpařování je materiál z povrchu terče odpařován pomocí laserového paprsku.

Výhody laserového odpařování

- odpařování lze provádět s přídavnou ionizací,
- produkce složek s vysokou energií, čímž dochází ke zlepšení kvality povlaku atd. [11].

Výhody laserového odpařování

- velmi nízká energetická účinnost,
- malá velikost povlakované plochy,
- rozstřikovací efekt vytváří mikročástice, které snižují kvalitu povlaku atd. [11].

3.2.3 Iontová implantace

Jde o hybridní PVD systém povlakování, kdy je povrch substrátu nebo deponovaný povlak bombardován svazkem částic s vysokou energií. Zdrojem deponovaných složek může být odpařování, odprašování plyny nebo páry. Jelikož je mezi substrátem a terčem vytvořeno silné elektrické pole (50 – 1000 V), dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře, který ionizuje částice plynu i odpařené částice terče. Touto reakcí iontů vzniká povlak, který se usazuje na povrchu substrátu [11,13,14].

Iontovou implantací lze nanášet povlaky rozmanitého složení s vynikajícími mechanickými vlastnostmi i na tepelně zušlechtnuté materiály [11].

3.3 Úprava nástrojů před povlakováním***Broušení, leštění, kartáčování***

Kvalita břítu a broušených ploch nástroje je z hlediska povlakování velmi důležitým parametrem, který ovlivňuje adhezi mezi podkladem a povlakem. V místech, kde se na povrchu vyskytují ostré nerovnosti nebo výrazné stopy po broušení, dochází k odlupování povlaku. Tento negativní jev lze minimalizovat mechanickou úpravou břitů a funkčních povrchů nástroje. U nástrojů z rychlořezných ocelí jsou nerovnosti odstraňovány odjehlením. Významným faktorem, který ovlivňuje adhezi povlaku, je výběr vhodného brusiva, jelikož některá abraziva mají velmi negativní vliv na následnou adhezi povlaků [10,13].

Odmaštění

Slouží k odstranění konzervačních a jiných mastných látek z povrchů nástrojů. Odmaštění se provádí průmyslovými odmašťovacími na bázi ropných derivátů s vlastnostmi odpovídajícími příslušným ekologickým normám. Odmašťovací prostředky obsahují uhlovodíky a tenzidy bránící nadměrnému odpařování a zajišťující dobrou smáčivost. Odmaštění se provádí v běžně dostupných jednoduchých odmašťovacích zařízeních [10,13].

Mokrý čištění

Provádí se pomocí kombinovaných metod s využitím oplachů (bez tlaku i tlakových), ultrazvuku, elektrochemických metod, vakuových sušení nebo odstředění, vyhřátí či odpaření těkavých kapalin. Jako průmyslová zařízení jsou využívány mycí linky s několika samostatnými mycími a oplachovými vanami, případně jednovanové systémy s automatickou výměnou jednotlivých technologických lázní (viz. obr. 11). Pracovním médiem jsou většinou kapalné čisticí prostředky (veškeré čisticí lázně se provádějí

v roztocích s demineralizovanou vodou). Po provedeném čištění následují oplachy, které mají za úkol nejen odstranit zbytky čistících lázní, ale i chránit očištěný povrch proti korozi. Pro zajištění kvalitního povrchu je potřeba smáčené povrchy rychle osušit [10,13].



Obr. 11 Průmyslová myčka [13].

Pískování

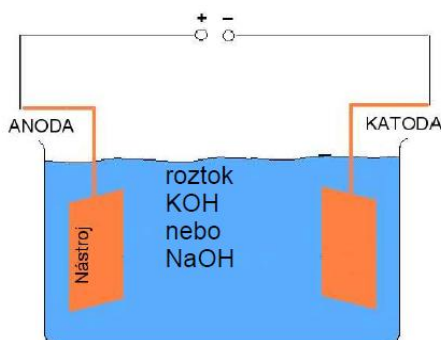
Pískováním lze odstranit pevně ulpívající nečistoty na povrchu, popřípadě i nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu pomocí abraziva SiC nebo Al_2O_3 se zrnitostí 20 – 100 μm [13].

Odjehlení

U materiálů z rychlořezných ocelí jde o metodu, která je standardně aplikována již u výrobců nástrojů. Využívá se ruční odjehlování nebo kartáčování. U nástrojů určených k povlakování by se neměly používat kartáče s plastovým vlasem, popř. některé mosazné kartáče. Ruční odjehlování pomocí pilníků nebo různých tkanin s abrazivou je značně individuální technologie s vysokým kolísáním reprodukovatelnosti [10,13].

Odstraňování starých povlaků (stripping)

Stripping je prováděn chemickou a elektrochemickou metodou, která využívá silných oxidačních činidel, popř. účinku elektrického proudu (viz. obr. 12). Pro odstranění povlaků z HSS se nejčastěji používá roztok peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu, ohřátý přibližně na teplotu 70 °C [10,13].



Obr. 12 Ukázka strippingu u HSS [14].

4 TYPY PVD POVLAKŮ NANÁŠENÝCH NA FRÉZY Z HSS

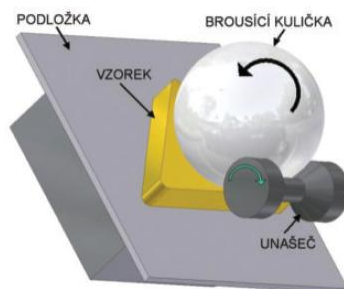
4.1 Vlastnosti PVD povlaků

Dnes je na trhu nabízena celá řada PVD vrstev, která se díky novým technologiím a požadavkům stále rozšiřuje. Volba povlaku je zásadně ovlivněna použitím a způsobem opotřebení nástroje s ohledem na jeho fyzikální a chemické vlastnosti. Správně použitá PVD vrstva zvyšuje užité vlastnosti nástroje [15].

Hlavním přínosem PVD povlaků je zvýšení životnosti a produktivity fréz při třískovém obrábění. Díky PVD povlaku je možné zvýšit standartní řeznou rychlost nepovlakovaného nástroje 1,3 x (u povlaku TiN), 1,4 x (u TiCN) a 1,5 x (u TiAlN, AlTiN). Ovšem uvedené hodnoty jsou pouze orientační, jelikož záleží na mnoha dalších faktorech jako je chlazení, vhodný stroj, správná volba povlaku pro obráběný materiál atd. [17].

Povlaky se především vyznačují:

- **otěruvzdornost** – u řezných nástrojů prodlužují i několikanásobně jejich životnost,
- **tepelnou odolnost** – povlaky odolávají vyšším teplotám (až 800 °C) a zároveň tvoří tepelnou bariéru. Tato vlastnost je využívána u vysokorychlostního obrábění, při kterém je 78% vzniklého tepla odváděno třískou,
- **korozivzdornost** – vlastnost, která zvyšuje odolnost proti korozi. Povlaky, dobře odolné proti korozi, jsou povlaky obsahující hliník ($TiAlN$) a uhlíkové povlaky,
- **snížením třecího odporu** – nízký koeficient tření mají např. MoS_2 , WC/C a DLC,
- **vysokou adhezi** – nejjednodušším měřením bývá pozorování okrajů vpichu vzniklého Rockwellovým hrotem,
- **tloušťkou vrstvy** – z hlediska praktické aplikace je volba tloušťky povlaku na břitech řezných nástrojů jednou z nejdůležitějších charakteristik. Nejčastěji je měřena pomocí kalotestu (viz. obr. 13),



Obr. 13 Ukázka kalotestu pomocí kuličky s diamantovou pastou [15].

- **mikrotvrdost** – k nejtvrdším povlakům patří DLC povlaky s mikrotvrdostí 30 GPa.

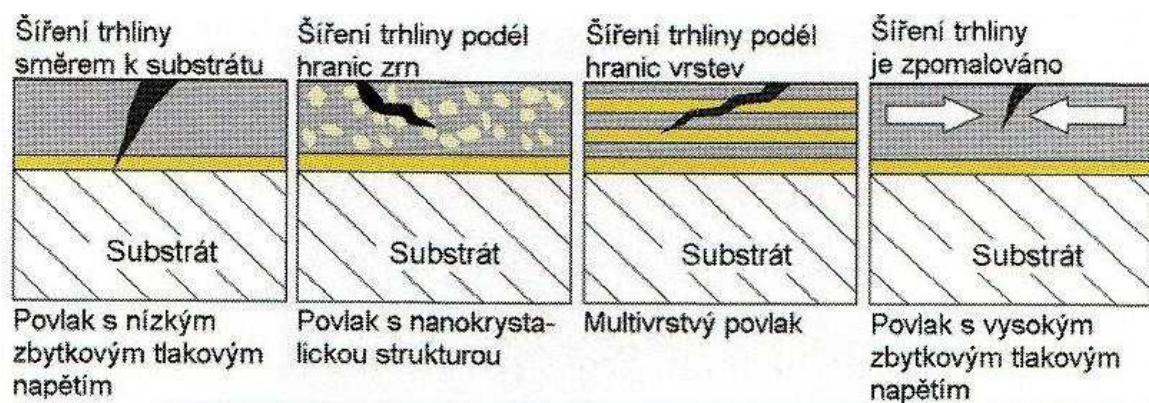
Pro účely výzkumu a při podrobnějším zkoumání se zjišťují ještě další charakteristiky, jako modul pružnosti, zátěžové křivky mikrotvrdosti, vnitřní pnutí, stechiometrie atd. [14,15,17].

4.2 Typy nanášených povlaků

Z důvodu požadavků na vyšší tepelnou a chemickou stabilitu povlakových vrstev, je třeba si uvědomit, že běžné vrstvy TiAlN, AlTiN nestačí. Proto jsou vrstvy např. jako TiAlN, ale i jiné připravovány v různých strukturovaných modifikacích, které zlepšují některé jejich fyzikálně-chemické vlastnosti (viz. obr. 14).

Mezi takovéto vrstvy patří:

- **multivrstvy** – zvyšují odolnost proti šíření poruch, čímž zvyšují výslednou měřenou tvrdost vrstev, užité vlastnosti v aplikacích a umožňují nanášet vrstvy ve větších tloušťkách než v případě monovrstev,
- **gradientní vrstvy (nanogradientní)** - mají průběžně proměnné složení vrstvy TiAlN tak, že k povrchu vrstvy se zvyšuje obsah Al, pro zabezpečení vysoké oxidační odolnosti při zachování dostatečné tvrdosti vrstvy,
- **nanovrstvy vrstvy** - představují systém multivrstvy, které mají tloušťku jednotlivých vrstviček pod hranicí 10 nm. Pokud je rozhraní mezi jednotlivými vrstvičkami s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi dostatečně ostré, pak lze najít optimální periodu střídání vrstviček, při které je tvrdost celé vrstvy výrazně zvýšená,
- **nanokompozitní vrstvy** – mají originální strukturu, čímž se řadí mezi povlaky s velmi vysokou tvrdostí a zároveň velmi vysokou tepelnou stabilitou a odolností vůči oxidaci. Nanokompozitní vrstvy v dnešní době reprezentují novou generaci velmi tvrdých PVD vrstev [22].



Obr. 14 Vliv různých typů povlaků na šíření trhlin [11].

4.3 Nejpoužívanější PVD povlaky

Charakteristika vybraných povlaků společnosti LISS a.s. (viz. obr. 15), která je dodavatelem povlaků pro společnost ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s.:

TiN – je základní povlak, který se používá pro obrábění nízkými řeznými rychlostmi a obrábění ocelí s nízkou pevností. Má výbornou odolnost vůči adhezivnímu opotřebení a ve srovnání s nepovlakovanými nástroji vykazuje o 30-40% větší trvanlivost ostří.

TiCN – povlak s vysokou odolností vůči otěru a s velmi nízkým koeficientem tření. Povlak je vhodný pro frézování ocelí se středním obsahem uhlíku, s nižší až střední pevností. Je ideálním povlakem pro frézování šedé litiny. Tento povlak vykazuje vysokou tvrdost a současně dobrou houževnatost. Důležitým faktorem pro efektivní obrábění u tohoto povlaku je kvalitní chlazení.

TiAlN – univerzální povlak pro obrábění celé škály materiálů středních a vyšších pevností středními a vyššími řeznými rychlostmi. Má výborný poměr tvrdosti a houževnatosti díky multivrstvé struktuře. Díky vyšší oxidační odolnosti a tvrdosti za vysokých teplot, nevyžaduje dokonalé chlazení.

AlTiN – povlak s velmi vysokou oxidační odolností vhodný pro náročné aplikace jako jsou frézování vysokými řeznými rychlostmi, popřípadě frézování bez chlazení. Povlak je vhodný například tvárné litiny, ocelí vysokých pevností, případně ocelí pro kování.

AlTiCrN – povlak pro náročné frézování materiálů s vysokou odolností proti otěru za tepla.

nACRo – nová generace nanokompozitního povlaku s vysokou tvrdostí a oxidační odolností. Vhodné pro obrábění těžko obrobitelných materiálů jako jsou slitiny titanu a teplotně odolné slitiny.

CrN – speciální povlak pro obrábění čistých neželezných kovů jako jsou hliník a měď. Povlak zabraňuje lepení obráběného materiálu na nástroj [17].

TYP VRSTVY	SLOŽENÍ	BARVA	TLOUŠŤKA μm	TVRDOST [GPa]	MAX. TEPLOTA POUŽITÍ	KOEFICIENT TŘENÍ PROTI OCELI
Alpha-PLATIT MP	TiCN multi	bronzově hnědá	1-4	33	400	0,2
Alpha-PLATIT	TiCN	šedá	1-4	37	400	0,2
Beta-PLATIT	TiN	zlatá	1-7	25	600	0,55
Delta-PLATIT	CrN	stříbrně šedá	1-4/10	18	700	0,3
Universal-PLATIT	TiAlN multi	fialová	1-4	30	800	0,4
Extra Al-PLATIT	AlTiN	černá	1-4	38	800	0,7
	AlTiCrN	tmavě šedá	1-4	40	900	0,55
	CrTiN	zlatá	1-4	30	600	0,4
AlXN3	---	černá	3-5	32	1000	0,4
cVlc	TiCN/DLC	černo šedá	1-3	37	450	0,15
CROMVlc2	CrN/DLC2	černá	1-5	25	700/450	0,1
nACo	---	fialově modrá	1-4	45	1200	0,45
nACRo	---	modro šedá	1-4	40	1100	0,35
DLC	---	černá	1	18	400	0,15
DLC2	---	černá	1-3	25	450	0,1
MoS2	MoS2	černá	0,5-1	-	400	0,1
nACo3	TiN+AlTiN+AlTiSiN	fialově modrá	1-4	45/34	1200/900	0,45

Obr. 15 Přehled nabízených povlaků od společnosti LISS a.s. [20].

4.4 Frézovací nástroje ze sortimentu společnosti ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s.

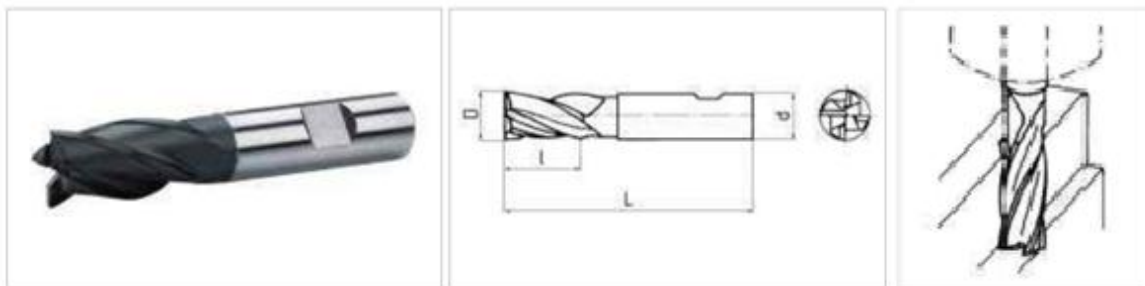
ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s. je největším výrobcem fréz z rychlořezných ocelí (HSS) v České republice.

Společnost je rozdělena na dvě divize: Frézy a Vakuová kalírna. Výroba fréz nabízí nástroje dle norem DIN a ČSN, ale také speciální frézy dle požadavků zákazníka. Tepelné zpracování oceli poskytuje technologické procesy nitridace, kalení, popouštění, žíhání, zušlechťování slitin hliníku atd. [26].

Pro dosažení vyšší životnosti a produktivity se na frézy nanášejí tvrdé otěruvzdorné povlaky. Dodavatelem povlaků pro ZPS je společnost LISS a.s., která používá technologie katodového obloukového napařování, jež je nejpoužívanější ve světě. Povlakování je pak realizováno na švýcarské technologii Platin [17].

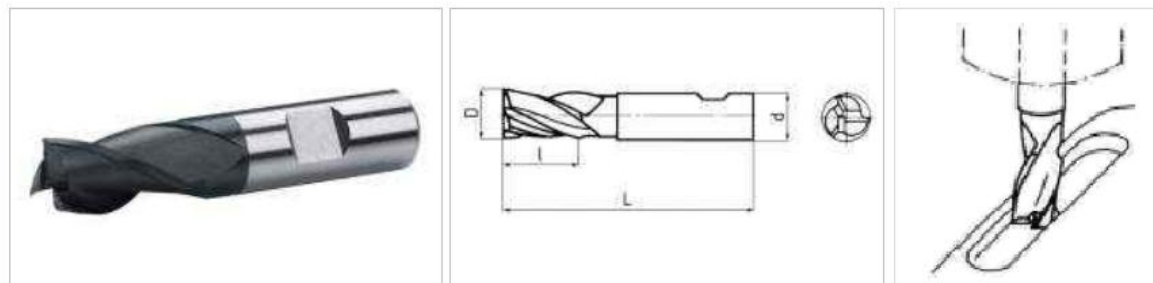
Vybrané frézy z katalogu společnosti ZPS

Tato válcová čelní fréza je vyrobená z vysoce výkonné oceli práškovou metalurgií s homogenní strukturou, která se projevuje vyšší rozměrovou stálostí a trvanlivostí ostří nástroje. Má univerzální použití a je vhodná pro obrábění materiálů do pevnosti 900 MPa. Na frézu je nanášen povlak TiAlN (viz. obr. 16).



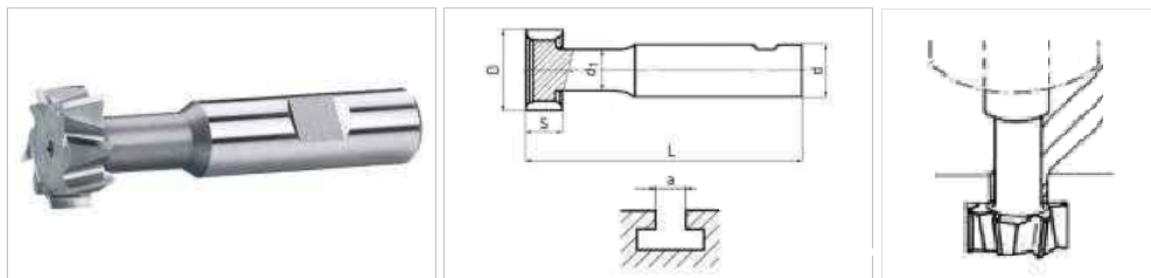
Obr. 16 Fréza válcová - čelní [23].

Fréza pro drážky je vyrobená z vysoce výkonné oceli vyrobené práškovou metalurgií s homogenní strukturou, která se projevuje vyšší rozměrovou stálostí a trvanlivostí ostří nástroje. Má univerzální použití a je vhodná pro obrábění materiálů do pevnosti 900 MPa. Na frézu je nanášen povlak TiAlN (viz. obr. 17).



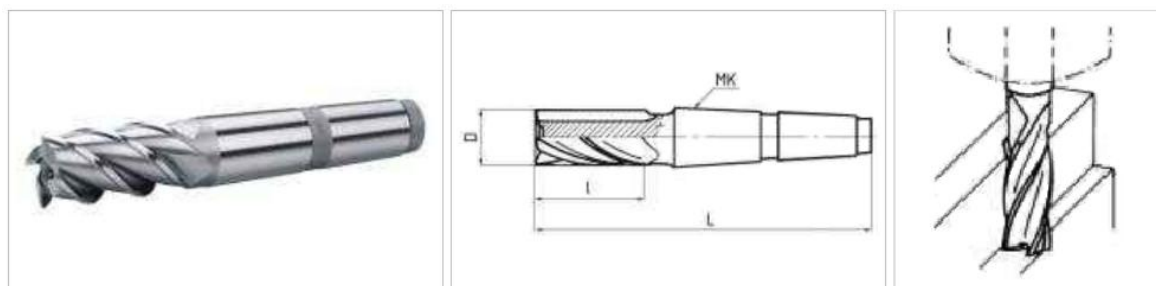
Obr. 17 Fréza pro drážky [23].

Tvarová fréza z vysoce výkonné rychlořezné oceli s hladkou stopkovou a dobrou houževnatostí pro frézování materiálů do pevnosti 1200 MPa. Tato fréza se vyznačuje univerzálním použitím a je vhodná pro obrábění materiálů s pevností do 900 MPa (viz. obr. 18).



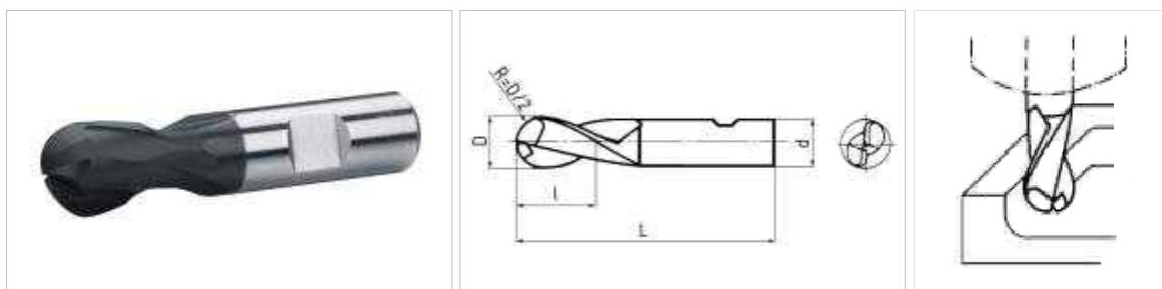
Obr. 18 Fréza tvarová – pro T drážky [23].

Fréza válcové čelní (s kuželovou stopkou Morse) z vysoce výkonné rychlořezné oceli s dobrou houževnatostí pro frézování materiálů do pevnosti 1200 MPa. Vhodná pro obrábění měkkých materiálů, např. hliníku a neželezných kovů (viz. obr. 19).



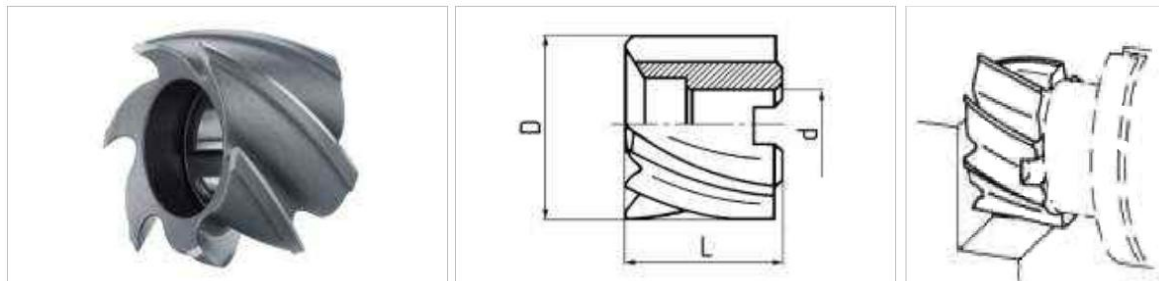
Obr. 19 Fréza válcová čelní – Morse kužel [23].

Kopírovací fréza z vysoce výkonné oceli vyrobená práškovou metalurgií má homogenní strukturu, která se projevuje vyšší rozměrovou stálostí a trvanlivostí ostří a nástroje. Na frézu je nanášen povlak TiAlN (viz. obr. 20).



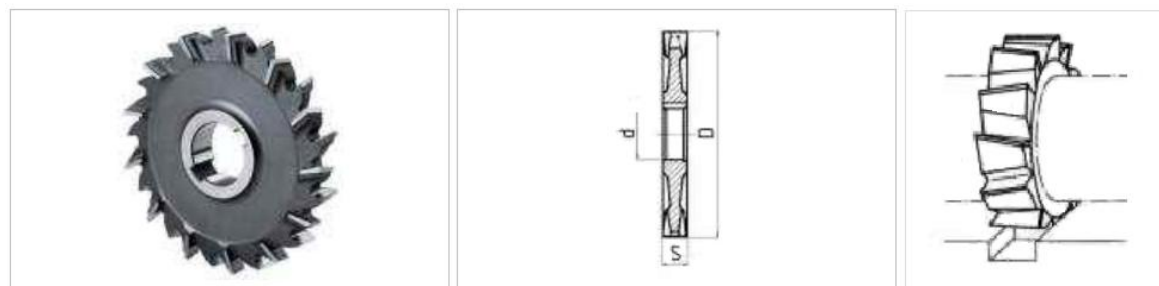
Obr. 20 Fréza kopírovací (krátká) – 2-zubá [23].

Fréza válcová čelní nástrčná (hrubozubá) je vyrobená litím z vysoce výkonné oceli s dobrou houževnatostí vhodná pro nástroje větších průměrů a kotoučů frézy. Vhodná pro obrábění měkkých materiálů, např. hliníku a neželezných kovů (viz. obr. 21).



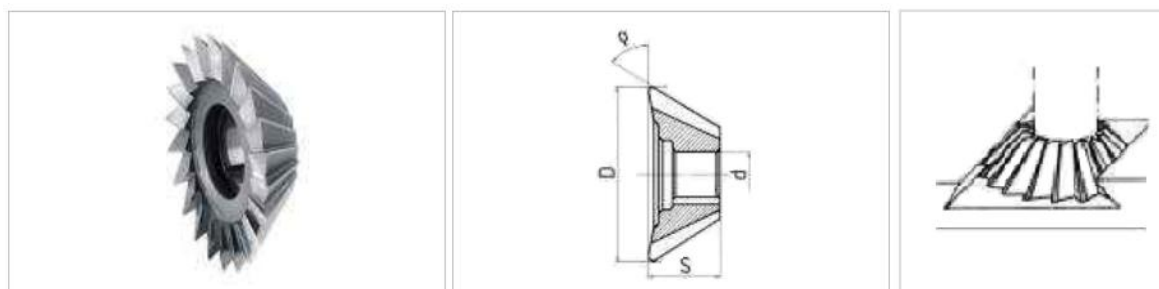
Obr. 21 Fréza válcová čelní nástrčná - hrubozubá [23].

Fréza kotoučová pro drážky vyrobená litím z vysoce výkonné oceli s dobrou houževnatostí vhodná především pro nástroje větších průměrů a kotoučů frézy. Určená pro frézování (dokončování) materiálů s pevností do 1200 MPa a lze dosáhnout drsnosti opracované plochy Ra 3,2 výjimečně i 1,6 (viz. obr. 22).



Obr. 22 Fréza kotoučová – pro drážky [23].

Fréza úhlová čelní z rychlořezné oceli středního výkonu, vhodná na frézy menšího průměru a frézování materiálu do pevnosti 900 MPa (viz. obr. 23).



Obr. 23 Fréza úhlová čelní [23].

Standartně společnost ZPS nabízí frézy z rychlořezné oceli s povlakem na bázi TiAlN nebo bez povlaku, kdy si kupující může vybrat povlak z přehledu nabízených povlaků společnosti LISS a.s., která pro společnost ZPS provádí povlakování nástrojů.

ZÁVĚR

I přestože je na trhu celá řada nástrojových materiálů (od nástrojových ocelí až po přírodní diamant), doposud neexistuje žádný univerzální nástrojový materiál na všechny druhy obráběných povrchů. Proto je důležité vždy pro konkrétní obráběcí nástroj zvolit vhodný nástrojový materiál, který bude splňovat požadované vlastnosti.

Pro frézování se nejčastěji používají nástroje vyrobené z rychlořezných ocelí nebo slinutých karbidů. Frézy vyrobené z těchto materiálů musí splňovat požadavky jako jsou tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu, houževnatost apod.. K dosažení optimálního využití nástrojů z rychlořezných ocelí, je důležité použít vhodnou procesní kapalinu, která ochlazuje nástroj v místě řezu.

Vývoj ve výrobě fréz z HSS lze spatřovat ve využití práškové metalurgie, jejímž cílem je zvýšit jakost rychlořezné oceli, která je následně použita na výrobu fréz. Dalším nezanedbatelným vývojem fréz z HSS je jejich povlakování metodou PVD a CVD, což vede ke zvýšení jejich životnosti a produktivity. Více používanou metodou povlakování je metoda PVD, která oproti metodě CVD probíhá za nižších teplot a díky tomu nedochází k tepelnému ovlivnění povlakovaného materiálu (frézy). Nejpoužívanějším povlakem, který se nanáší na frézy z HSS je povlak na bázi TiAlN.

Největším tuzemským výrobcem fréz z rychlořezných ocelí je společnost ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s., která si díky svým dlouholetým tradicím, zkušenostem a vysoké kvalitě výrobků za příznivé ceny, našla uplatnění i na evropských trzích, především pak v Německu. Aby se u fréz dosáhlo zvýšení životnosti a produktivity spolupracuje společnost ZPS úzce se společností LISS a.s, která se zabývá nanášením tvrdých otěruvzdorných povlaků (typy dodávaných povlaků viz. kapitola 4.3) [27].

Pro nanášení tvrdých otěruvzdorných povlaků na frézy společnost LISS a.s. používá technologie katodového obloukového napařování, která je nejpoužívanější ve světě. Povlakování je pak realizováno na švýcarské technologii Platin [17].

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. první. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *TEORIE OBRÁBĚNÍ, TVÁŘENÍ A NÁSTROJE*. první. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
4. FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky Brno, 1994, 229 s.
5. KŘÍŽ, Antonín. *Tepelné zpracování rychlořezných ocelí*. Plzeň: ZČU v Plzni. 31 s. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download_sma.html
6. *Druhy rychlořezných ocelí (HSS)*. [online]. [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/druhy-rychlorezných-oceli-hss>
7. *Zpracování nástrojových ocelí*. [online]. [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojovky/zpracovaniNO/>
8. KŘÍŽ, Antonín. *Vady tepelného zpracování rychlořezných ocelí*. Plzeň: ZČU v Plzni. 8s. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/VADY_TPELNEHO_ZPRACOVANI_RYCHLOREZNYCH_OCELI.pdf
9. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: ZÁKLADNÍ METODY OBRÁBĚNÍ*. [online]. 1. část. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, 2004 [cit. 2012-04-28]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
10. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: ZÁKLADNÍ METODY OBRÁBĚNÍ*. [online]. 2. část. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, 2004 [cit. 2012-04-28]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
11. HUMÁR, Anton. *MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE*. první. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008, 235s. ISBN 978-80-254-2250-2.
12. *Prospekt PDF Povlakování*. [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.vuhz.cz/media/povlaky-CVD-a-PACVD/Prospekt%20Coating%20centrum.pdf>
13. *Technologie úprav nástrojů před a po povlakování*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/files/literatura/35.pdf>
14. KŘÍŽ, Antonín. *Tenké vrstvy*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
15. *Měření vlastností povlaků na nástrojích*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/files/literatura/29.pdf>

16. *Současnost a trendy povlakování technologií PVD*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>
17. *Typy povlaků*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/html/typy-povlaku-24.html>
18. *Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/files/literatura/30.pdf>
19. *Purpose and importance of face and parallel milling*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://collections.infocollections.org/ukedu/en/d/Jgtz106be/1.html>
20. *Typy povlaků*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.liss.cz/?page=products&i=kopz2i380m8jhuf5uz906xd5lhqkmfwf>
21. *NÁSTROJE PRO FRÉZOVÁNÍ – DĚLENÍ*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-frezovani.blogspot.com/2011/03/14-nastroje-pro-frezovani-deleni.html>
22. *Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-pvd-povlaky-pro-rezne-aplikace-a-tvareni.html>
23. *Nový frézovací materiál s PVD povlakem*. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novy-frezovaci-material-s-pvd-povlakem.html>
24. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ*. [online]. 1. část. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, 2004 [cit. 2012-04-28]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
25. *E-SHOP - NÁSTROJE / Katalog fréz*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/katalog-frez/>
26. *Hlavní strana*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/>
26. *O společnosti*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/html/o-spolecnosti.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
C	[-]	slinutý karbid
CNC	[-]	Computer Numeric Control
Co	[-]	cobalt
Cr	[-]	chrom
CVD	[-]	Physical Vapour Deposition
HSS	[-]	rychlořezná ocel
KM	[-]	keramický nástrojový materiál
Mo	[-]	molybden
PKD	[-]	polykrystalický diamant
PKNB	[-]	polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition
SK	[-]	slinutý karbid
W	[-]	wolfram

Symbol	Jednotka	Popis
A_{Di}	[mm]	jmenovitý průřez třísky
D	[mm]	průměr obrobku
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
f_z	[mm]	posuv na zub
h_i	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
n	[min ⁻¹]	otáčky vřetene
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_e	[m.min ⁻¹]	efektivní výsledný pohyb
v_f	[m.min ⁻¹]	vedlejší pohyb
z	[-]	počet zubů
φ_i	[°]	úhel posuvového pohybu

