



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava



Progresivní metody v obrábění

studijní opora

Josef BRYCHTA

Marek SADÍLEK

Robert ČEP

Jana PETRŮ

Ostrava 2011

Název: Progresivní metody v obrábění
Autoři: Josef BRYCHTA, Marek SADÍLEK, Robert ČEP, Jana PETRŮ
Vydání: první, 2011
Počet stran: 128
Náklad: 30 ks
Vydavatel a tisk: VŠB – TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže

Studijní materiály pro vzdělávání středoškolských pedagogů.

Jazyková korektura: nebyla provedena.

Určeno pro projekt:

Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost

Název: Podpora moderních metod výuky v oblasti výrobních technologií pro pedagogické pracovníky středních škol

Číslo: CZ.1.07/1.3.05/03.0019

Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava

Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© Josef BRYCHTA, Marek SADÍLEK, Robert ČEP, Jana PETRŮ

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2513-7

Obsah:

1.	PROGRESIVNÍ METODY V TRÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ	3
1.1.	Zásady ekonomické a produktivního obrábění	3
1.2.	Aspekty a efekty vysokorychlostní technologie.....	10
1.3.	Výkonnostní „vysokoobjemové“ - HVC obrábění.....	18
1.4.	Činnosti provázející současné výrobní prostředí	44
2.	MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	55
2.1.	Vlastnosti řezných materiálů	55
3.	EFEKTIVNÍ STRATEGIE OBRÁBĚNÍ	84
3.1.	Efektivnost obrábění ve vztahu k obráběcímu stroji a řídicímu systému	84
3.2.	Simulace a verifikace	87
3.3.	Vztah CAD/CAM systémů k HSC obrábění.....	93
3.4.	Optimalizace obrábění v CAD/CAM systémech	94
3.5.	Volba CAM systému	101
3.6.	Vliv segmentace trajektorie pohybu nástroje na efektivnost obrábění	102
3.7.	Postprocesor – Postprocesing	107
3.8.	Provádění měření na obráběcích strojích	110
3.9.	Nové trendy vývoje v oblasti CAD/CAM systémů.....	112
4.	Obrábění tvarových ploch	114
4.1.	3-osé frézování tvarových ploch	115
4.2.	Víceosé frézování tvarových ploch	123
5.	Strategie frézování při obrábění naklopeným nástrojem.....	134
6.	Výběr technologie víceosého obrábění.....	140

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden čas potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat ...
- definovat ...
- vyřešit ...

Okamžitě potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



Shrnutí kapitoly

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



Kontrolní otázka

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



Úkol k řešení

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v databázové praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavní význam předmětu a schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti při řešení reálných situací hlavním cílem předmětu.



Klíč k řešení

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek výše jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

1. PROGRESIVNÍ METODY V TŘÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

Budete umět:

- Popsat progresivní metody v obrábění.
- Popsat vysokorychlostní technologie.
- Popsat „vysokoobjemové“ – HVC obrábění.
- Získáte všeobecný přehled činnostmi provázející současné výrobní prostředí.

Budete umět

Budete schopni:

- Popsat zajištění celkové výroby a její jakosti.
- Popsat proces tvorby třísky.
- Detailněji popsát „vysokorychlostní“ a „vysokoobjemové“ obrábění.

Budete schopni

1.1. Zásady ekonomické a produktivního obrábění



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat výrobní procesy
- popsát možnosti snižování výrobních nákladů
- vyřešit optimalizaci výrobního nářadí

Současná konkurence v celosvětovém tržním prostředí se průběžně mění na základě konkrétních a krátkodobých požadavků nejrůznějších výrobních zakázek. Zkracující se realizační časy stále náročnějších výrobků jsou umožněny okamžitým přenosem zpravidla jednoznačných dat po www sítích, zlepšenou komunikací, a rychlejší (např. leteckou) dopravou. Toto směřuje ke geografickému rozšíření trhu, týkajícího se nákupu i prodeje.

Přesto, anebo právě proto, že soudobá ekonomika nezná hranic, propastné rozdíly mezi mzdovými náklady a finální cenou výrobku tlačí stále více firem k takzvané globalizaci trhu. Každý prvek hospodářství je tímto vystaven značnému konkurenčnímu tlaku, zejména proto, že zahraniční firmy operují v nejrůznějších geografických oblastech. Z toho vyplývá, že se na celosvětovém trhu uplatní pouze výrobce, který je schopen včas nabídnout zboží žádané jakosti za předem dohodnutou cenu.

Má-li výrobce v konkurenčním prostředí obstát, musí nepřetržitě výrobní proces zdokonalovat a inovovat. Znamená to, že na jedné straně hledá možnosti ve zlepšení organizačních opatření, na straně druhé pak v oblasti výrobních prostředků a výrobních technologií. Zatímco o oblasti organizačních opatření byly v uplynulých patnácti letech vedeny rozsáhlé polemiky, v současné době přicházejí do popředí zájmu technologické otázky.

Technologie, které jsou již nyní většinou k dispozici, mohou být hospodárně (natož pak optimálně) využívány jen v tom případě, jsou-li nejprve vnímány, chápány a až poté transformovány dostatečně kvalifikovanými a permanentně se vzdělávajícími zaměstnanci. Význam člověka, jako hlavního hnacího činitele v podniku, rozhodujícího o prioritních otázkách spravování a řízení podniku, byl znovu postaven do nezastupitelné role¹.

K charakteristickým znakům dnešní doby náleží nesmírně rychlý rozvoj vědy a techniky. Neustálý růst strojírenské výroby, která je neoddělitelná od výzkumu a vývoje, vyžaduje stále těsnější spojení teorie obrábění s technologickou praxí.

Současné strojírenství představuje hlavní odvětví průmyslu a je základem rozvoje ostatních průmyslových odvětví. Současným trendem ve strojírenství je kladení důrazu na kvalitu a efektivitu výroby, na její technickou, ekologickou i estetickou úroveň. Rovněž se soustředí na hospodaření se surovinami a energií.

¹ REUTELER, A. Werkzeugtechnologie im Hochgeschwindigkeitsfräsen. Bellach: Fraisa SA, 1997. 185 s.

Možnosti snižování výrobních nákladů

Mnohé studie efektivnosti výrobních procesů již v minulosti s dostatečnou statistickou významností dokázaly, že na skutečné výrobní činnosti připadá pouze 7 % celkové kapacity stroje, při jednosměnném provozu s uvažováním pracovního volna i časů všech dalších ztrát. Z toho plyne, že snižování spotřeby času zkracováním prostřednictvím vlastního obrábění je neefektivní a nákladné, protože představuje zvýšení technických nároků na NC stroje. Proto byl od sedmdesátých let, dnes již minulého století, prosazován trend výstavby automatizovaných výrobních systémů, které umožňují prakticky nepřetržitý provoz a výrazně zkracují všechny vedlejší časy, zejména manipulační. Návratnost těchto systémů je však dlouhá.

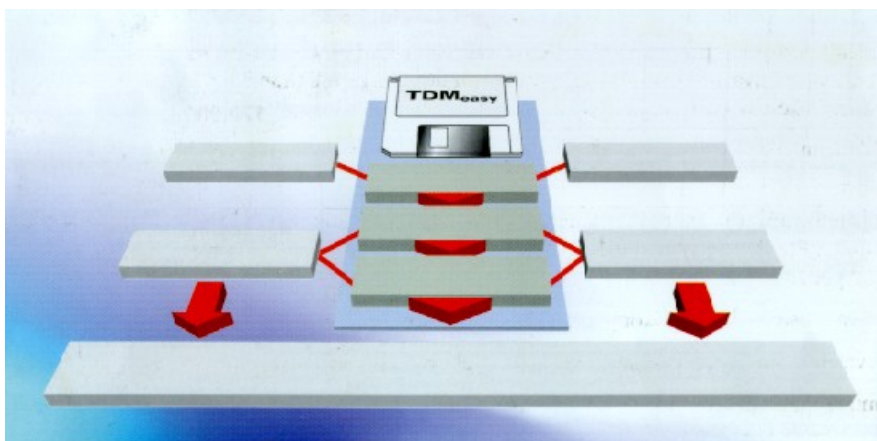
Efektivitu však lze dosáhnout mnohem jednoduššími a méně nákladnějšími prostředky, a to vyšším kapacitním využitím strojů. Tím může být například vícesměnný, až nepřetržitý provoz s omezením prostojů, zpravidla vynucovaných tím, že řada činností je vykonávána a řízena člověkem.

Pokud jeho úlohu omezíme alespoň takovou automatizací, která tyto činnosti zajišťuje, vzroste výrazně efektivita celého procesu. Toho se dosahuje využitím NC strojů např. ve spojení s různými dopravními zařízeními, manipulátory a roboty, které na základě požadavku stroje automaticky zakládají nový polotovár, případně přemísťují hotový výrobek.

Tento způsob zvyšování efektivity výroby při současném snižování výrobních nákladů však nelze použít vždy a všude. Například při kusové výrobě forem, stříhadel či zápusťek se nejedná o velkosériovou výrobu a časy na manipulaci s polotovarem jsou oproti strojním časům nepodstatné. Přesto lze i tyto strojírenské provozny, a to zavedením účinného systému pro hospodaření s nářadím podstatně zproduktivnit a zefektivnit.

Zavedení systému pro hospodaření s nářadím

V současné době je mnohými prozíravými strojírenskými podniky směřována značná pozornost na oblast informační technologie. Mimořádné úsilí je věnováno reengineeringu a podnikovým informačním systémům. Rovněž zavádění vhodných systémů pro hospodaření s nářadím se může stát účinným prostředkem ke zvýšení produktivity a snížení výrobních nákladů.



Obr. 1 Integrovaný systém TDM_{easy} Firmy WALTER

Například německá firma WALTER z bavorského Tübingenu nabízí, zejména pro menší a střední podniky představující řádově 150 až 200 zaměstnanců, účinný, jednoduchý a cenově příznivý systém pro hospodaření s náradím, uváděný pod zkratkou TDM_{easy} . Prezентuje jej především jako manipulačně jednoduchý a současně velmi účinný. Opírá se o dlouholetou vývojovou zkušenost při používání zákaznický specifikovaných systémů pro hospodaření s nástroji v rámci výrobní řady TDM.

Vybraný integrovaný systém je údajně první program pro hospodaření s nástroji a náradím, který obsahuje průvodce funkcemi, jímž provádí uživatele celým programem. Tím podstatně snižuje dobu zpracování a přibližuje okamžik „plného využití systému“.

Tento průvodce poskytuje správnou podporu pro různé činnosti jako:

- zakládání nových nástrojů nebo nových kompletních nástrojových sestav,
- zaúčtování skladových přírůstků,
- požadavek na vypracování objednávky,
- evidence nástrojů,
- hrubé seřizování nástrojů.

Nabízené integrované systémy některých známějších společností obsahují nejrozumnější potřebné prostředky od knihoven montážních nástrojových celků, vedení administrativy skladů, až po podporu plánování v nástrojárnách včetně řízení a kontrolu kvality. Aby byl některý z nabízených systémů vhodně vybrán a účinně zaveden, což může představovat zvýšení doby aktivního obrábění při současném snížení zásob nástrojů řádově v desítkách

procent, musí být nejprve zpracována základní databáze, tedy katalog veškerých používaných obráběcích nástrojů.

Sledování životnosti a spotřeby nářadí

Zásadním momentem každé významné změny bývá okamžik její realizace. Jedním takovýmto mezníkem v již navyklé organizaci práce může být zahájení sledování a zaznamenávání skutečného pohybu a spotřeby všech nástrojů a skupin nářadí. Vždy psychologicky významným, i když ne z pohledu personálních a mezilidských vztahů jednoduchým rozhodnutím, bývá konkrétní zahájení mapování amortizace a spotřeby veškerého nářadí, vztahujícího se konkrétně k jednotlivým operátorům. Jakkoliv může být toto období (i z hlediska personálních změn) obtížné až nepříjemné, je z hlediska perspektivního vývoje hospodaření s nářadím nevyhnutelné.

Využívání zavedeného systému k optimálnímu nasazování nářadí

Důsledkem skutečného mapování pohybu a spotřeby nástrojů a nářadí lze kontrolovat, ale především korigovat skutečnou a plánovanou spotřebu nářadí.

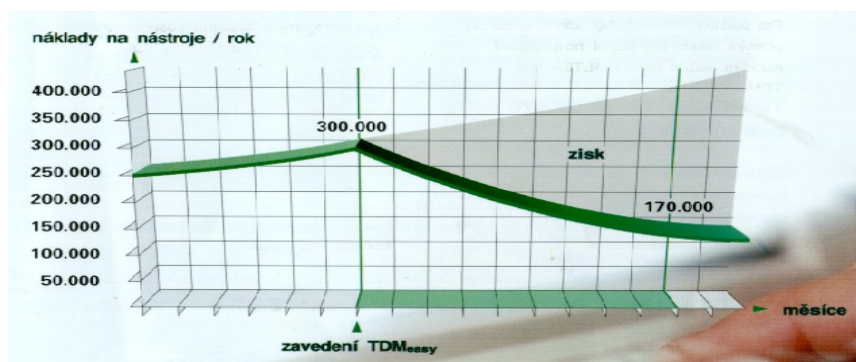
Informace o standardních nebo preferovaných nástrojích v rámci „Nástrojárny“ včetně fyzických rozměrů nástrojů a formátových dat CAD, umožňují optimalizovat konstruktérské práce již v počátečních fázích vývoje. Účinnost NC programování se zvyšuje díky tomu, že jsou k dispozici data týkající se:

- preferovaných řezných rychlostí,
- hodnotách posuvu, což zjednodušuje i sestavování sběrných seznamů,
- určování záložních nebo alternativních voleb nástrojů.

Vhodně zavedené systémy pomohou realizovat, a to zejména při správné aplikaci, zvýšení produktivity výroby při současném snížení výrobních nákladů. Publikované studie potvrzují, že účinně zavedený systém pro hospodaření s nástroji prodlužuje dobu jejich aktivního obrábění, a tím trvanlivost řezných nástrojů o 40 až 50%.

Účinnému a efektivnímu zavedení jakéhokoliv systému hospodaření s nářadím musí předcházet jeho řádná evidence, spojená se sledováním jeho veškerého pohybu.

Teprve pak lze zavést například jeden samostatný modul, tedy základní databázi obsahující všechny informace o každém nástroji. Konkrétně se jedná o umístění ve skladu až po výrobní stroje, na kterých se nástroje „realizují“. Náklady na pořízení a zavedení vybraného systému se odvíjejí od předem obtížně specifikovaných skutečností. Lze však „úspěšně předpokládat“ jejich návratnost. Další podstatný efekt vyplyne z plynulosti výroby (snížení neproduktivních časů, minimum prostojů) a zejména ze zvýšení kvality výroby.



Obr. 2 Graf předpokládaných úspor v eurech

Zabezpečení jakosti a kvality výroby

Současná konkurence a trh se neustále mění na základě požadavků zákazníka. Změny probíhají rychlejším tempem a požadavky jsou stále náročnější. Chce-li výrobce v této náročné a nepřetržité soutěži obstát, musí neustále hledat nová řešení, která vedou k ekonomicky výhodnějším a kvalitativně vyšším technologiím.

S tímto neoddelitelně souvisí i požadavky na zabezpečování jakosti měřicího zařízení, které stanovuje ČSN ISO 10012-1, jejíž první částí je metrologický certifikační systém pro měřicí zařízení. Termín „měřicí zařízení“ v příslušném kontextu označuje souhrn zařízení. Jednotlivý měřicí přístroj, měřicí převodník nebo celý měřicí systém se nazývá „položka měřicího zařízení“ v organizaci, kde se vedou o jednotlivých položkách příslušné záznamy.

Norma ISO 10012-1 doplňuje normy řady ISO 9000. Zabývá se podrobně měřicím zařízením v rámci systému jakosti. Termíny a definice z oblasti metrologie byly většinou převzaty z mezinárodního metrologického slovníku (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie – VIM) vypracovaného v roce 1984 Sekretariátem ISO v Ženevě.

Mimo některých účelně upravených definic jsou v této normě definovány dva nové termíny, a sice „metrologická confirmace“ a měřicí zařízení“. „Metrologická confirmace“ je

nově zavedený a definovaný termín. Používá se v těch případech, kdy nelze přiměřeně použít termín „kalibrace“ (podle VIM), neboť zahrnuje ještě další operace, jako je posouzení zjištěných chyb, popř. seřízení, oprava nebo nově provedená kalibrace apod. Tento termín má podobný význam jako „ověřování měřidel“, avšak neobsahuje požadavek, aby tyto operace provedl metrologický orgán nebo aby měřidlo bylo opatřeno ověřovací značkou.

Výše uvedené termíny se nesmí zaměňovat. Rovněž je třeba brát v úvahu, že termín „ověřování“ používaný v normách řady ISO 9000 označuje v systémech jakosti zcela jiný pojem než „ověřování měřidel“. Normy řady ISO 9000 a další souvisící normy se nezabývají povinným ověřováním stanovených měřidel, jak je to vymezeno v národních metrologických předpisech (viz zákon o metrologii č. 505/1990 Sb.) – nezasahují do oblasti legální metrologie. Termín „měřicí zařízení“ v příslušném kontextu označuje souhrn (jedná se o souhrnný termín). Jednotlivý měřicí přístroj, měřicí převodník nebo celý měřicí systém apod. se nazývá „*položka měřicího zařízení*“.

1.2.Aspekty a efekty vysokorychlostní technologie



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat vliv třísky na obrobenou plochu
- popsat princip tvorby třísky

K jedné z předních progresivní technologií současnosti patří tzv. 3D - prostorové obrábění. Proces řezání (třískového obrábění) zde může být řízen, vyžaduje-li to finální tvar obráběné součásti, simultánně (souběžně) probíhá ve třech, ale i více osách. Může se jednat o technologicky jednoduché, ale také o velmi náročné plochy prostorově nepravidelných tvarů, které jsou často i matematicky obtížně definovatelné. Perspektivní metoda, která řeší mnohé problémy „klasického třískového řezání kovů a jejich slitin“ zmíněných ploch se nazývá HSC (High Speed Cutting – „vysokorychlostní řezání – „obrábění“). Smyslem této progresivní technologie je snížit cenu výrobku při současném zvýšení jeho kvality.

Utváření třísky a její vliv na obrobenou plochu

Utváření třísky při řezání (obrábění) kovů patří k velmi složitým heterogenním deformačním a destruktivním procesům. Doposud uznávané přístupy vedoucí k definici mechanismu tvorby třísky při řezání jsou převážně založené na geometrických modelech. Někteří autoři preferují deformační a stříhové procesy v rovině (Brix, Glebov, Merchant, Time a další), jiní zas v objemu vyskytujícímu se pod řeznou hranou nástroje (Hitany - Okoshi, Jonson, Oxley – Palmer, Zorev). Nejblíže však k realitě procesu řezání dospěl Loladze, který definuje proces řezání jako obtékání řezného klínu obráběným materiálem prostřednictvím vyvolané plastické deformace.

Pro objasnění podstaty procesu tvorby třísky považujeme za významný, často publikovaný, metalograficko – faktografický přístup. Podstata mnohých experimentů spočívá v okamžitém zastavení procesu při minimálním ovlivnění geometrických poměrů při tvorbě třísky. Tímto způsobem získané vzorky jsou pak podrobeny metalografickým a faktografickým rozborem na bázi současných fyzikálně – metalurgických poznatků.

Spolupůsobení nástroje a obráběného materiálu vyvolává silový účinek, který lze v principu charakterizovat jako sílu normálního tlaku třísky na čelo nástroje F_n a sílu tření F_t , která působí na ploše styku nástroje s tvořící se třískou. Tyto složky se sumarizují ve výslednou sílu F , jejíž působíště je přibližně ve středu kontaktu třísky s čelní plochou řezné části nástroje. Výsledná síla vyvolává v obráběném materiálu reakci opačného znaménka, která působí ve středu úsečky považované za rozhraní mezi základním materiálem a právě se vytvářející třískou. Fyzikální podstatu této síly tvoří deformační odpor materiálu.

Břit řezného nástroje není schopen odebrat tloušťku třísky menší, než je jeho poloměr ostří

$$a_p \leq r. \quad (1.2.1)$$

Při tloušťce odřezávané vrstvy dané tímto vztahem je velikost měrného řezného odporu nekonečně velká. Je-li odebírání tloušťky a_p odřezávané vrstvy menší než je poloměr ostří, dochází k tomu, že tloušťka materiálu, která se břittem v daném poloměru neodebírá, ale odchází pod břit, je menší ve srovnání s hodnotou a_{min} . V důsledku existence určitého poloměru ostří, tak nastává k dělení materiálu ne v úrovni tečny k břitu ve směru řezného pohybu, ale v úrovni odpovídající tloušťce materiálu a_{min} a po vytvoření třísky v úrovni a'_{min} . Způsobuje to stav napjatosti před břittem, kdy se u ostří vytváří tah, který napomáhá vzniku třísky, tedy dělení materiálu před břittem.

Vlivem plastických deformací obráběného materiálu se bod největších napětí posouvá směrem do obráběného materiálu a přechází tak do bodu B . Část materiálu pod tímto bodem odchází pod břit, kde se plasticky a elasticky deformuje a zpevňuje. V důsledku této deformace, vysoké teploty a strukturních změn zde vznikají různá zbytková pnutí. Výsledek zpevnění je též ovlivněn oblastí primární plastické deformace dosahující (l_1 , l_3) pod úroveň plochy řezu. Důsledkem elastické deformace pak dochází k odpružení plochy řezu o tloušťku materiálu l_2 . Tyto naznačené skutečnosti významně ovlivňují funkční vlastnosti obrobené plochy.

Způsob tvorby třísky u klasického obrábění

Základní podmínkou progresivního obrábění je naprostá převaha požadovaných fyzikálních vlastností materiálu řezného nástroje nad materiálem obráběným. Obecně lze předpokládat, že se vzrůstající řeznou rychlostí roste celkové množství tepla, a to téměř

úměrně s narůstající rychlostí stříhu třísky i intenzitou tření třísky o nástroj. Plastickou deformací třísky v rovině stříhu se „skokově“ mění její teplota, která dále roste třením třísky o čelo nástroje.

Při klasickém obrábění dochází ve smykové rovině k mechanickému zpevnění třísky, které vede k jejímu ztvrdnutí oproti původnímu stavu. Díky tomu, že zpevněná tříska klade větší odpor, narůstá úhel roviny stříhu, který zvyšuje tloušťku třísky i její odpor proti ohybu a současně zvětšuje plochu kontaktní zóny.

Mezi třískou a čelem nástroje „*spolupůsobí*“ přitlačné i třecí síly, které tímto nabývají vysokých hodnot. Dochází takto k přechodu velké části tepla vyvolaného třením z třísky do nástroje. Třecí teplo a značná přitlačná síla třísky podporují difusní procesy, které vedou k vymílání kráteru na čele nástroje. Intenzita vývoje celkového procesního tepla roste úměrně se zvyšováním rychlosti *smyku třísky* ve smykové rovině, ale také s řezným odporem, který je dán obráběným materiálem.

Za těchto podmínek se nedají (anebo jen velmi obtížně) obrábět tvrdé a kalené materiály. Z uvedených faktů vyplývá, že „*horní interval*“ řezné rychlosti je u „běžných“ řezných materiálů a „konvenčních“ nástrojů omezen prudkým poklesem řezivosti způsobeném náhlou plastickou deformací, kterou způsobuje intenzivně rostoucí procesní teplo.

Během řezného procesu lze provádět pozorování mikrozměn i makrozměn. Přímé pozorování změn v mikroskopických objemech, které odpovídají řádově velikosti zrna je značně obtížné vzhledem k vysoké deformační rychlosti v_d , (řádově se pohybující 10^4 až 10^6 m.s⁻¹), intenzivní a nerovnoměrné deformaci a vysokému teplotnímu gradientu při ohřevu deformovaného materiálu (řádově 10^4 až 10^6 °C.s⁻¹), ovlivňujícímu zejména v oblasti sekundární deformace, jak deformační zpevnění, tak i fázové přeměny.

Uvedené charakteristiky výrazně omezují přímé pozorování mikrozměn v oblasti kořene třísky na úzký rozsah řezných podmínek, týkajících se pouze nižších řezných rychlostí. Mezi experimentální metody přímého zjišťování mikrozměn patří fotografování boční plochy vzorku při ortogonálním řezání a rychlostním filmování. Kamery pro rychlostní filmování se nazývají časové lupy. Podstatou je zde fotografování zkoumaného děje vysokou snímkovou frekvencí (4000 až 18000 obr.s⁻¹) a následné promítnutí s frekvencí podstatně nižší. Nevýhodou je však složitě, pracně a nákladně provedení experimentu.

Přímé pozorování změn v makroskopických objemech je méně obtížné než přímé pozorování mikrozměn. Makroskopické změny se mohou pozorovat fotografováním boční plochy vzorku při ortogonálním řezání, rychlostním filmování nebo přímým pozorováním pod mikroskopem, avšak za extrémně nízkých řezných podmínek. Boční plocha zkoumaného vzorku je opatřena pomocnou mřížkou, pomocí níž lze určovat deformace jednotlivých elementů, což umožní vymezení deformačních oblastí a stanovení charakteru a intenzity deformace ve směru zvolených souřadných os. Při použití časové lupy má tento způsob experimentálního studia velký význam pro sledování vzniku elementární třísky a pro sledování tvorby i rozpadu nárůstku.

Experimentálním studiem změn ukončených lze stanovit součinitel přechování třísky

$$K = \frac{a_1}{a} = \frac{l}{l_1} = \frac{S_1}{S} > 1 \quad (1.2.2)$$

Primární plastické deformace mají za následek rozdíl mezi průřezem odřezávané vrstvy S a průřezem vzniklé třísky S_1 . Tloušťka vzniklé třísky a_1 je vždy větší než tloušťka odřezávané vrstvy (přechování příčné) a délka vzniklé třísky l_1 je vždy menší než odpovídající dráha nástroje l (přechování podélné).

Vedle délkové metody stanovování K se častěji používá metoda hmotnostní, při které se zváží hmotnost vzniklé třísky m_1 změřené délky l_1 a při známé měrné hmotnosti ρ obráběného materiálu se součinitel přechování třísky K dá vypočítat z matematického výrazu

$$K = \frac{1000 \cdot m_1}{l_1 \cdot \rho \cdot S} \quad (1.2.3)$$

Intenzitu primární plastické deformace ε lze stanovit ze vztahu

$$\varepsilon = \frac{K^2 - 1}{K} \cdot \sin \gamma_{\perp} + \frac{K \cdot \cos \gamma_{\perp}}{K} \quad (1.2.4)$$

Rovněž je možné orientačně při studiu makrozměn stanovit velikost primární plastické deformace ε (poměrný kluz) z výrazu

$$\varepsilon = \cot g \delta + g \cdot (\delta - \gamma_{\perp}) \quad (1.2.5)$$

Za předpokladu, že v důsledku řezné rychlosti probíhá pohyb částic uvnitř oblasti O'OMN rovnoměrně, je možné na základě hodnoty Δx stanovit deformační rychlost v_d

materiálu i ve směru posuvové rychlosti v_f . Také se sníží plocha kontaktní zóny (plocha styku odcházející třísky s čelní částí břitu řezného nástroje) a omezí sekundární nárůst teploty třísky třením v kontaktní zóně. Do nástroje se přenáší minimální množství tepla, protože naprostá většina vygenerovaného tepla (až 95 %) odchází s třiskou. Třecí síla F_r mezi dvěma relativně k sobě se pohybujícími elementy je pro stacionární stav popsána zákonem:

$$F_r = \mu F_n \text{ [N]}. \quad (1.2.8)$$

Koeficient tření μ je přitom přijímán jako konstantní veličina. Pro vysokorychlostní třískové obrábění tento předpoklad neplatí, protože koeficient μ nezůstává konstantní¹, ale se stoupající řeznou rychlostí klesá. Na spodní straně třísky může v extrémních případech docházet k vytváření tekuté vrstvy, tedy k dosažení teploty tavení obráběného materiálu. Tím je tření na čelní ploše nože redukováno, proto ubývá pýchování třísky a přirůstá zakřivení třísky.

Úbytek pýchování třísky vede k přírůstku úhlu kluzu (resp. úhlu stříhu, jak se také uvádí v některé odborné literatuře), a tím k podstatnému redukování přetvárné práce. Utvářející se tříska „zčervená“ (obr. 3) a následně sníží svou přitlačnou sílu F_n na čelo nástroje A_γ .

Zatímco v podmínkách klasického obrábění (nízká řezná i posuvová rychlost a velký pracovní úhel γ_{ne}) se tříska stýká s čelní plochou A_γ nástroje a postupně si vytváří žlábek, při optimálně zvolených řezných parametrech a pracovní geometrii řezného nástroje (pracovní úhel čela γ_{ne} je blízký nule nebo může dosahovat i záporných hodnot) se v podmínkách HSC obrábění se vznikající, utvářející a současně odcházející tříska pouze dotýká čelní části břitu řezného nástroje a se zcela vyčerpanou plasticitou vhodně zkroucená a správně „nasměrovaná“ urychleně opouští „prostor řezu“ rychlostí odchodu třísky v_t , která je svou hodnotou prakticky srovnatelná (koeficient neboli součinitel pýchování třísky K je blízký jedné) rychlosti řezání v_c .

Tento děj nastává i při obrábění kalené oceli, kde takto zahřátá tříska rovněž změkne. Třecí síla, ale i celkový řezný odpor poklesne, zmenší se úhel smykové roviny, ztenčí se průřez třísky, a tím se zvýší rychlost odchodu třísky v_t z kontaktní zóny.

Plocha kontaktní zóny se naopak sníží, čímž se omezí sekundární nárůst teploty třísky třením v kontaktní zóně. Do nástroje se za těchto podmínek přenáší minimální množství tepla, protože převážná většina vygenerovaného tepla „odchází s třiskou“. Tento popsany děj

způsobuje, že se, i přes celkově značný nárůst uvolněného tepla během procesu, omezí působení nežádoucích difusních mechanismů i mechanického vymílání čela.

Vysoká kvalita řezné hrany (jemnozrnná struktura) „HSC“ nástrojů a důmyslné povlakování jejich povrchů zvyšují odolnost čela i celého břitu proti abrazivnímu i difusnímu opotřebení. Podíl přestupu procesního tepla do nástroje se ještě více snižuje z důvodu jeho „napovlakování“, které v tomto případě také plní funkci tepelně izolační vrstvy.

Růst teploty řezné části nástroje se po dosažení určité řezné rychlosti zpomaluje. Při obrábění hliníku dosahuje teplota (tzv. limitní teplota obráběného materiálu) svého maxima okolo 600 °C, u bronzů 1 000 °C, v případě šedé litiny kolem 1 300 °C a u obrábění oceli okolo 1 500 °C.

Následné zvyšování řezné rychlosti nevede k zvláště výraznému zrychlování procesu opotřebení nástroje, vede však k výraznému zkracování strojního času obrábění. Vyšší teplota třísky je tedy pozitivním faktorem a principiálním zdrojem příznivých efektů vysokorychlostního třískového obrábění.

Chlazení „místa obrábění“, tak jak ho známe z klasické (konvenční) technologie, zde není zpravidla nutné a mnohdy ani žádoucí, poněvadž by bránilo dosažení „vysokorychlostního režimu“.

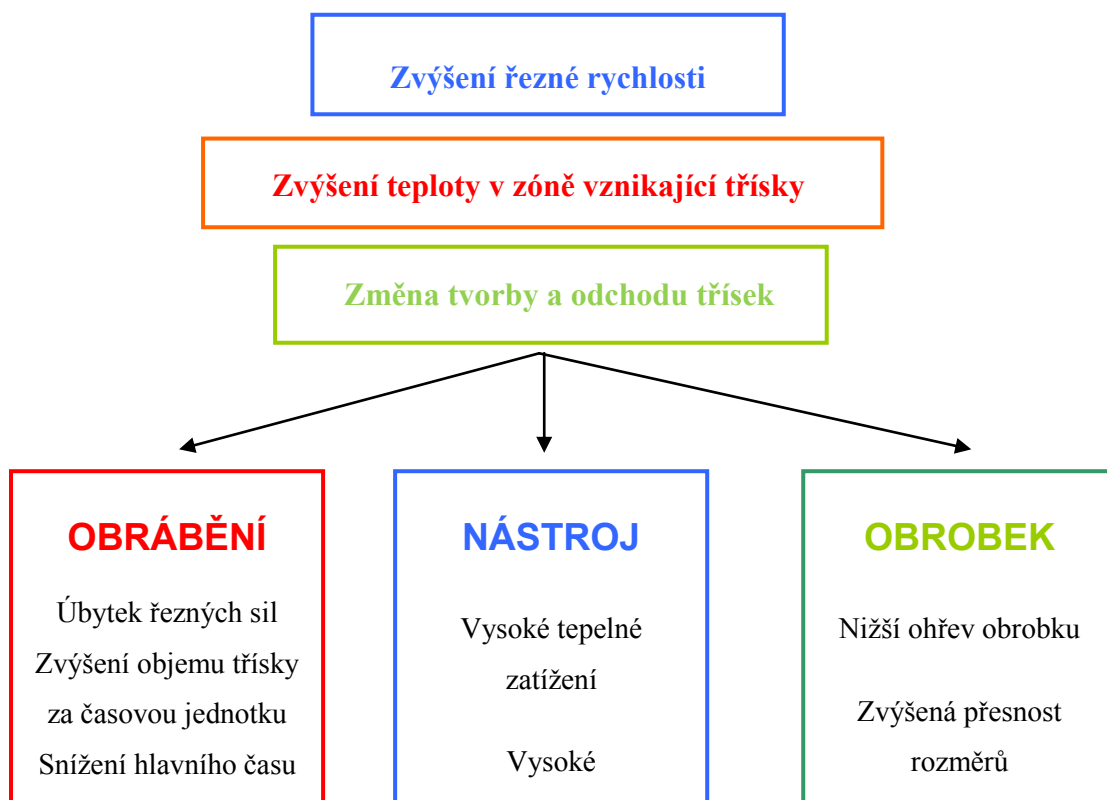
Z hlediska zvýšené citlivosti supertvrdých řezných materiálů na tepelné šoky není kapalinové chlazení mnohdy ani přípustné. V případě nepřerušovaného obrábění keramických a jiných supertvrdých materiálů může být potřebná teplota dosažena laserovým předehříváním obráběného materiálu⁹, a to těsně před jeho vstupem do primární zóny stříhu.

Význam řezných podmínek ve vysokorychlostním procesu

Řezné podmínky představované zejména řeznou rychlostí v_c , rychlostí posuvu v_f , a tloušťkou obráběné vrstvy a_p , spolu s řeznou geometrií zastoupenou především úhlem čela γ_n , úhlem sklonu ostří λ_s , a hlavním úhlem nastavení κ_r , měly a stále mají na průběh procesu třískového obrábění zásadní vliv. Nedá se tedy nepředpokládat, že u rychlostního a dokonce vysokorychlostního obrábění s definovanou řeznou geometrií tomu bude jinak. Proces vysokorychlostního obrábění (zejména soustružení a frézování) je ve srovnání s konvenčním obráběním charakterizován především změnou vzniku třísky a jejího odchodu, což je zásadní pro pochopení celé „HSC technologie“³.

Zvýšením řezné rychlosti, a s tím vázaným zvýšením rychlosti posuvu lze dosáhnout hlavního požadavku, totiž podstatného zvýšení objemového úběru za časovou jednotku, respektive snížení hlavního času¹. Kromě toho se vysokým počtem otáček vřetena sníží jeho kmity, což umožní klidné obrábění obrobků citlivých vůči kmitání³.

S rostoucí řeznou rychlostí se oblast primární plastické deformace zužuje (Obr. 3 oblast *OMNO*'), čímž se energie vydaná na plastickou i elastickou deformaci soustředí do menšího objemu. Tento fakt způsobuje nižší energetickou spotřebu, protože se přetvárná práce soustřeďuje do menšího prostoru a probíhá rychleji. S klesajícím deformačním koeficientem ($1 \leq K \leq 10$) roste rychlost odchodu třísky v_t , jejíž průřez se tímto zmenšuje. Rostoucí teplota v místě řezu způsobuje snižování měrného řezného odporu p .



Obr. 5 Zevní projevy zvýšené řezné rychlosti v podmínkách „HSC“

S rostoucí deformační rychlostí v_d roste teplotní gradient, čímž se zase naopak zkracuje doba styku bříty nástroje s právě vznikající částí obrobenej plochy, která se tímto méně prohřívá. Řezný proces probíhá rychleji, při vyšším objemovém úběru za časovou jednotku, čímž se také snižuje strojní čas i celková energetická náročnost třískového obrábění.

1.3. Výkonnostní „vysokoobjemové“ - HVC obrábění



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat podstatu výkonnostního řezání
- popsat vysokorychlostní obrábění
- stanovit optimální řezné podmínky

Podstata vysokorychlostního „vysokoúběrového **HVC**“ - obrábění a tudíž výkonostního řezání (zejména frézování a soustružení na víceosých obráběcích strojích CNC) spočívá především v dosahování kratších strojních časů při současném zvýšení přesnosti a kvality obrobených prostorových ploch převážně nepravidelných, matematicky obtížně definovaných tvarů. Tohoto bezesporu značně nesnadného požadavku „HSC - technologie“ dosahuje prostřednictvím vysokých řezných rychlostí v_c , především však podstatně zvýšenou rychlostí posuvu v_f .

Dalším neméně důležitým činitelem je nárůst teploty v místě řezu, který způsobuje úbytek řezných složek, a tím celkové síly obrábění. V neposlední řadě rovněž způsobuje menší ohřev obrobku vyvolaný změnami poměru tvorby třísky.

Vhodné využití výpočetní techniky s kvalitním CAD/CAM systémem ve spojení s technologií vysokorychlostního obrábění podstatně zkracuje čas výroby, která je představována obráběním „načisto“ bez následné ruční dokončovací operace – „*tušírování*“ (zaškrabávání). V některých průmyslových odvětvích technologicky vyspělých států, např. v automobilovém a leteckém průmyslu, ve výrobě nástrojů forem a modelů, je „HSC–technologie“ již běžně úspěšně využívána.

V současnosti je zaváděna do oblastí jemné mechaniky a přesného strojírenství. Její rychlé a efektivní zavádění vyžaduje úzkou spolupráci mezi uživateli, výrobcí strojů a nástrojů, jakož i firmami vyvíjejícími CAD/CAM systémy.

Aplikace „HSC – technologie“ již dosáhla vysoké úrovně při opracování lehkých kovů. Tenkostěnné obrobky z hliníku, součásti s vysokými požadavky na jakost povrchu (části pouzder) jsou pomocí této technologie hospodárně opracovávány.

Při výrobě nástrojů a forem stojí v popředí možnost snížit rozteč řádků, a tím současně snížit čas pro ruční dohotovení. Výroba nástrojů a forem je nejdůležitějším artiklem pro mnohá průmyslová odvětví, a proto zaujímá klíčovou pozici.

Zvyšováním objemu odebrané třísky z povrchu obráběného polotovaru za jednotku času se z vysokorychlostního frézování dostáváme do „značně racionalizačního“ *vysokoobjemového frézování* (HVC), jehož výkony se mohou řádově pohybovat (při hrubování) až v tisících $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Základní charakteristiky vysokorychlostního obrábění

„HSC – technologie“ zahrnuje mimo vlastního vysokorychlostního obrábění (viz Tab. 1.3.1, 1.3.2) bez použití chladicí a mazací kapaliny, také tvrdé obrábění. Rychlostní frézování prosazuje téměř výhradně sousledné (sousměrné) frézování, které je charakterizováno minimalizací trhavých pohybů. Je výhodnější z hlediska silového než nesousledné.

Řezná síla působí směrem do upínače obrobku, a není proto nutné vyvodit tak velkou upínací sílu jako u nesousledného frézování. Dále zde dochází k menšímu opotřebení nástroje, což je dáno tím, že při nesousledném frézování dojde ke vniknutí zubu frézy do materiálu, až když tloušťka obráběného materiálu před zubem frézy přesáhne velikost poloměru ostří ($r_n = 25$ až $35 \mu\text{m}$). Do té doby dochází vlivem poloměru ostří k deformaci obráběného povrchu i k jeho zpevňování, které tímto znesnadňuje obrábění.

Cílem těchto technologií je dosažení řádově vyšší kvality řezného procesu, integraci strojních operací i pružnou automatizaci. Tyto nové technologie mají vzájemně úzkou návaznost. Princip vysokorychlostního obrábění spočívá ve zvýšení úběru třísek, zkvalitnění obráběného povrchu a z něj plynoucí prodloužení životnosti nástroje.

Toto je zejména docíleno podstatným nárůstem řezné rychlosti, která způsobuje snížení průřezu odcházející třísky, a tím pokles řezné síly. Relativně vysoká rychlost odchodu třísky vzhledem k čelní ploše nástroje, ve spojitosti s novou kvalitou (zvýšenou stabilitou) řezné hrany umožňují zajistit zvýšení podílu tepla, odcházejícího třískou.

V neposlední řadě zde dochází ke snižování tepelného a mechanického zatěžování nástroje, čímž se prodlužuje jeho životnost. Snižování řezných sil za současné redukce tepelných toků do nástroje, rámu stroje i obrobku vede ke zvýšení přesnosti a kvality obrobku.

„Suché obrábění“ znamená vyloučení či minimalizaci používání tzv. „procesních kapalin“, při současném snížení nákladů na jejich pořízení, filtraci, recyklaci a konečně také likvidaci.

Ekologicky „čisté řešení“ (za stále se stupňujících legislativních požadavků) je obvykle velmi složité, takže se často používá „kvazi-suché“ obrábění. Metoda spočívá v ponechání určitého, poměrně silně redukováného množství kapaliny pro mazání kontaktních ploch třísky a nástroje, což především vede ke snížení třecí síly.

Technologie tzv. „tvrdého“ obrábění umožňuje opracování kalených ocelí a jiných velmi tvrdých materiálů nástroji s definovaným tvarem řezné hrany. Tato progresivní technologie představuje možnost nahrazení ekonomicky, ekologicky a energeticky nevýhodnou broušením, která obrobek značně degeneruje. Jejím rozšíření přispívá, zatím stále jen postupně zavádění a využívání kubického nitridu boritého (KBN resp. CBN).

Tabulka 1.3.1 Rozsahy řezných rychlostí pro vybrané metody HSC obrábění

Meze	soustružení	vrtání	frézování	Fr. závitů	protahování	vystružování	řezání	broušení
	v_c [m.min ⁻¹]							
Horní	8 000	1 100	6 000	400	70	250	200	9 500
Dolní	800	100	500	120	12	10	70	6 000

Tab. 1.3.2 Rozsahy řezných rychlostí pro vybrané metody HSC obrábění

Meze	ocel	Slitiny Ti	Slitiny Ni	Litina	Slitiny Al	Plasty zpevněné	Bronzy mosaz
	v_c [m.min ⁻¹]						
Horní	1 100	1 000	280	1 600	6 000	8 000	3 000
Dolní	800	150	160	900	3 000	2 800	1 100

Způsoby HSC technologií

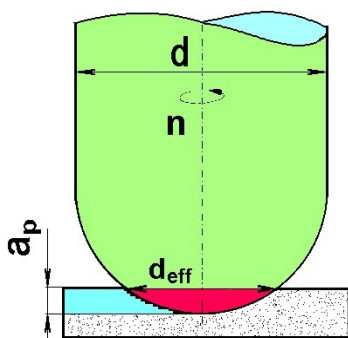
Zatímco neustálé zvyšování řezné rychlosti mnohdy vede k výraznému snižování trvanlivosti řezného nástroje, zvyšování rychlosti posuvu má na trvanlivost velmi malý vliv. Navíc dosahování vysokých rychlostí při soustružení malých průměrů či frézování malými efektivními průměry fréz d_{eff} , klade vysoké nároky na konstrukční a technické parametry obráběcích strojů.

Soustružíme-li naopak větší součásti, bývá zpravidla energeticky nevhodné vzhledem k jejich setrvačným hmotnostem je roztáčet do velmi vysokých otáček a po obvykle krátkém strojním čase je opět náročně „ubrzďovat“.

Význam rychlosti posuvu v rychlostním obrábění

Při dokončovacích operacích v 2D až 5D frézování se zpravidla používají frézy malých průměrů ($d \leq 6$ mm) s „kulatým čelem“. Na takto malých průměrech se i při velmi vysokých otáčkách rotačního několikabřitého řezného nástroje, který je upnut v hlavním vřetenu obráběcího centra (bez možnosti naklonění), nedosahují dostatečně velké, natož pak velmi vysoké řezné rychlosti. Pokud ano, tak jenom velmi obtížně, a to při velmi vysokých až maximálních otáčkách vřetene obráběcího stroje.

Problém je umocněn tím, že jejich funkční, tedy efektivní průměry d_{eff} , kterými je řezná rychlost prakticky určována, jsou redukovány, zejména při dokončovacích operacích, tedy malých hodnotách tloušťky obráběné vrstvy a_p na polovinu až třetinu průměru frézy d .



Obr. 6 Efektivní průměr kulové frézy d_{eff} při dokončovacím frézování

Pro názornost uveďme tento příklad: Frézujeme-li dvoubřitou stopkovou frézou s kulatým čelem o průměru $D = 6$ mm, hloubkou řezu $a_p = 0,20$ mm, bude její efektivní průměr d_{eff} , na kterém se efektivní řezná rychlost realizuje, dle následujícího výpočtu.

$$d_{eff} = 2 \cdot \sqrt{d \cdot a_p - a_p^2} = 2 \cdot \sqrt{6 \cdot 0,2 - 0,2^2} = 2,154 \text{ mm.} \quad (1.3.1)$$

Pozn.: Vztah (1.3.2) platí pro nulový úhel naklonění osy nástroje, kde $\beta = 0^\circ$.

Při maximálních otáčkách vřetene $n_{max} = 2500 \text{ min}^{-1}$, které lze zadat např. obráběcímu frézovacímu centru WHN 13 CNC, dosáhne efektivní řezná rychlost $v_{c,eff}$ při zvoleném průměru frézy d a tloušťce obráběné vrstvy a_p , dle následujícího vztahu hodnotu

$$v_{c,eff} = \frac{\pi \cdot n_{max} \cdot d_{eff}}{1000} = \frac{\pi \cdot 2500 \cdot 2,154}{1000} = 16,92 \text{ m.min}^{-1} \quad (1.3.2)$$

Pro tento jednoduchý výpočet lze použít upravený vztah (pro $\beta = 0^\circ$)

$$v_{c,eff} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{1000} \sqrt{d \cdot a_p - a_p^2} \quad (1.3.3)$$

V současné praxi často používané tříosé frézovací centra WHN 16 CNC při $n_{max} = 12\,000 \text{ min}^{-1}$ umožní dosáhnout v tomto případě pouhých $v_{c,eff} = 81,2 \text{ m.min}^{-1}$. Uvedené příklady dokazují, že se při těchto parametrech o vysokorychlostní obrábění z hlediska řezné rychlosti v_c nejedná. Ani WHN 16 CNC svými technickými parametry, zejména posuvovými rychlostmi, rychlofrézování „s plným efektem“ neumožňuje. Maximální strojní posuvová rychlost dosahuje „pouze“ $v_{f,max} = 8 \text{ m.min}^{-1}$, rychloposuvy pro přejezdy nástroje nebo obrobku až $v_{ff,max} = 25 \text{ m.min}^{-1}$.

Pozn.: Jak je již výše ve studijním textu uvedeno, pro plné uplatnění efektů HSC obrábění je zapotřebí alespoň $v_f = 15 \text{ m.min}^{-1}$. Přísluvce „pouze“ je ironicky uvedeno v uvozovkách proto, že ještě v současnosti průměrná rychlost posuvu při frézování a soustružení i ve vyspělých průmyslových zemích nepřesahuje hodnotu $v_f = 1 \text{ m.min}^{-1}$.

Rychlost posuvu v_f vypočítáme ze vztahu:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{mm.min}^{-1}]. \quad (1.3.4)$$

Maximální strojní posuvy (nikoliv přejezdové rychloposuvy) však mohou být realizovány pouze tehdy, umožní-li to pevnost a geometrie řezných elementů nástroje a výkon obráběcího stroje v souvislosti s obráběným materiálem, tuhost soustavy, ale i posuv na zub (tzv. „velkorádiové“ nebo také „velkoposuvové“ VBD).

Stanovení optimálních řezných podmínek pro víceosé frézování

Pro stávající technologické prostředí je vhodné korigování alespoň některých podkladů pro optimalizaci řezných podmínek v závislosti na konkrétních výchozích parametrech obrábění všude tam, kde je to přípustné a možné. Stanovení optimálních řezných podmínek je především časově, materiálově, ekologicky, energeticky a tím i finančně velmi náročné. Z těchto důvodů je nezbytné provedení každého experimentu předem zodpovědně naplánovat.

Optimální řezné podmínky úzce souvisí s optimální trvanlivostí břitu řezného nástroje. Obecně nelze od sebe oddělit určení optimální trvanlivosti a optimálních řezných podmínek. Toto lze provést jen za určitých okolností. Proto je nejvýhodnější použít komplexního optimalizačního výpočtu³¹, jehož řešením jsou optimální hodnoty řezných podmínek a trvanlivosti, resp. i optimální hodnoty dalších proměnných.

Stanovení oblasti přípustných řešení musí být provedeno s respektováním zákonitostí teorie obrábění s přihlédnutím ke konstrukčním možnostem obráběcího stroje, tuhosti obráběcí soustavy, konkrétní kinematice obrábění a pracovní geometrii břitu řezného nástroje, požadované rozměrové přesnosti a kvality obrobeného povrchu, typu výroby (sériová, kusová), termínu zhotovení zakázky apod.

Při aplikaci lineárního parametrického programování na výpočet optimálních řezných podmínek se uvažuje jako proměnný parametr trvanlivost T_n . Soustava lineárních nerovností, zvlášť určená pro tento případ vyjadřuje funkční závislost jednotlivých omezujících podmínek na výsledku řešení.

Pro názorné srovnání lze uvést příklad oblastí přípustných řešení z hlediska technických, ale i konstrukčních omezení tříosého WHN 13 CNC, a šestiosého japonského HEXAPODU. Pak může následovat určení optimálních řezných podmínek. Zásadní rozdíl mezi těmito obráběcími centry spočívá v možnosti či nemožnosti naklápění vřetene stroje, což rozhodujícím způsobem ovlivňuje „variabilitu“ obrábění.

Tabulka 1.3.3 Technické parametry obráběcího stroje WHC 13CNC firmy TOS Varnsdorf

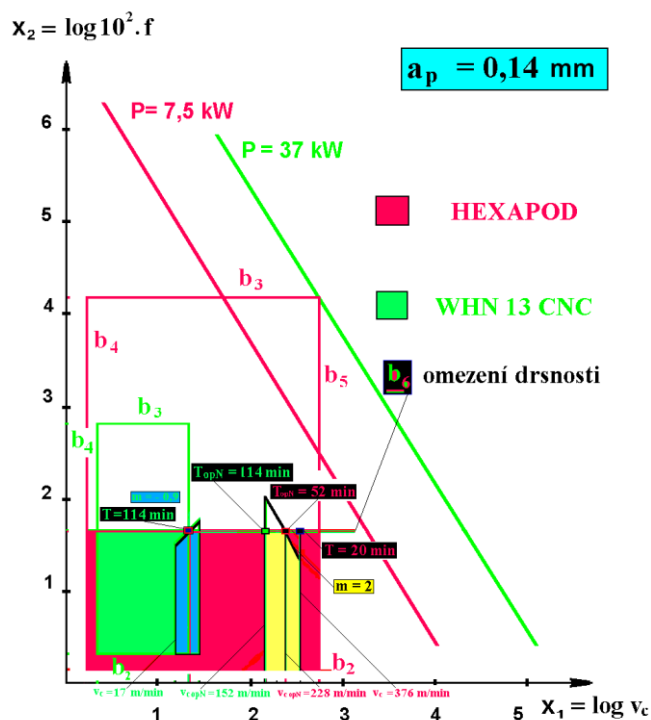
PARAMETR	HODNOTA	JEDNOTKA
Průměr pracovního vřetene	130	[mm]
Upínací kužel pracovního vřetene	ISO 50	[-]
Rozsah otáček vřetene	260 – 2 500	[min ⁻¹]
Výkon hlavního motoru	37	[kW]
Příčné přestavení stolu (X)	2 000	[mm]
Svislé přestavení stolu (Y)	2 000	[mm]
Podélné přestavení stolu (Z)	1 250	[mm]
Vyložení pracovního vřetene (W)	800	[mm]
Upínací plocha stolu	1 600 x 1 800	[mm]
Maximální hmotnost obrobku	12 000	[kg]
Pracovní posuvy X, Y, Z, W	6 000	[mm.min ⁻¹]
Rychloposuv X, Y, Z, W	8 000	[mm.min ⁻¹]
Počet nástrojů v zásobníku	60	[-]
Max. ø nástroje zcela obsazeného zásobníku	125 - 150	[mm]
Max. ø nástroje při volných sousedních místech	320	[mm]
Max. délka nástroje	500	[kW]
Max. hmotnost nástroje	25	[kVA]
Celková hmotnost nástrojů	85	[kg]
Hmotnost obráběcího CNC stroje	36 850	[kg]

Tabulka 1.3.4 Technické parametry HSC strojů firmy OKUMA

PARAMETR	6-osý HEXAPOD	M3X - H	MA – 550VB	ROZMĚR
Pracovní prostor	450 x 450 x 400	520x460x420	1 350 x 560	[mm]
Pracovní stůl	600 x 600	400 x 400	1 350 x 560	[mm]
Max. hmot. obrobku	400	400	1 000	[kg]
Osa X	450	520	1 300	[mm]
Osa Y	450	460	560	[mm]
Osa Z	400	420	560	[mm]
Úhel naklonění/otočení	+/- 30 ⁰	Po 1 ⁰	-	[⁰]
Max. otáčky vřeteníku	30 000	15 000	6 000 (25000)	[min]
Akcelerace	1,5	1,4	0,5	[G]
Max. výkon vřeteníku	7,5	22	22	[kW]
Max. krouticí moment	2,3	-	1 120	[Nm]
Rychloposuv osy X	100	120	40	[m/min]
Rychloposuv osy Y	100	120	40	[m/min]
Rychloposuv osy Z	100	120	30	[m/min]
ATC	-	12	32 (48)	[-]
Max. pracovní posuv	40	30	30	[m/min]
Upínací kužel	40	40	50	[-]
Zastavěná plocha	2,270 x 2,030	1,550 x 3,500	3,200x2,795	[m]
Hmotnost	-	8 200	11 800	[kg]
Řídicí systém	OSP – U100	OSP–E100M	OSP–E100	[-]

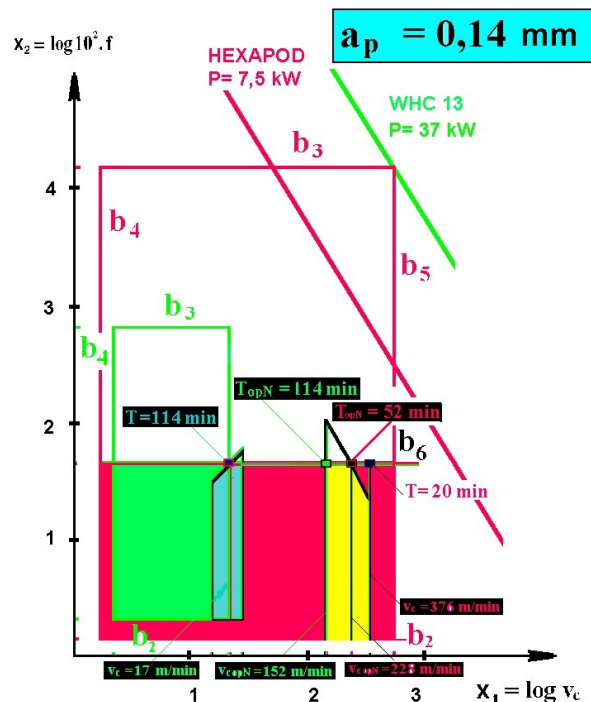
Oblast přípustných řešení

Následně znázorněná oblast přípustných řešení je dána především technickými omezeními, konstrukčními podmínkami, ale i technologickými zákonitostmi. Zejména omezení posuvu na zub, který je úzce propojen s požadavky na drsnost a pevnost jednotlivých zubů fréz malých průměrů, „nedá vyniknout“ horním partiím oblastí, které jsou dány technickými možnostmi (parametry) obráběcích center.



Obr. 7 Oblasti přípustných řešení obou variant

Vyšší řezné a posuvové rychlosti však lze realizovat s frézami větších průměrů, které mohou mít a také mají vyšší počty zubů. Zde se při stejném posuvu na zub a neměnných otáčkách vřetene dosahuje kratších strojních časů a vyšších objemových úběrů při stejných drahách a tloušťkách úběru a_p . Zejména Hexapod, koncepčně zkonstruovaný pro vysokorychlostní obrábění nemůže v zadaných podmínkách plně uplatnit své možnosti, konkrétně nejvyšší posuvy.

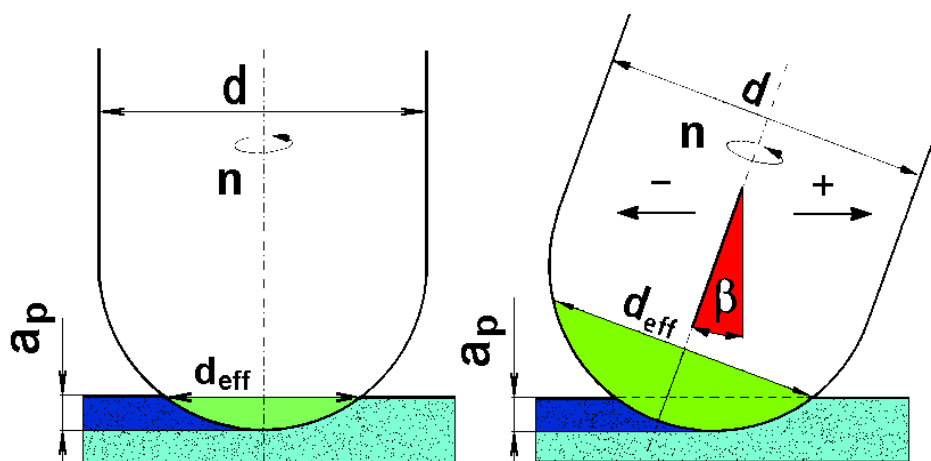


Obr. 8 Detail oblastí přípustných řešení s optimálními trvanlivostmi i rychlostmi

Chyba! Objekty nemohou být vytvořeny úpravami kódů polí.

Obr. 9 Míra závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti břitu řezného nástroje

Obrázek 10 vypovídá o různých mírách závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti břitu řezného nástroje m při jinak konstantních (neměnných) řezných parametrech. Při konkrétní konfiguraci, (nástroj, obrobek, řezné parametry, řezná geometrie i kinematika, řezné prostředí), která je ve studijním textu níže uvedena, byly experimentálně vyšetřeny uvedené hodnoty, z nichž plyne, že m při nízkých v_c nabývá záporných hodnot (závislost se „obrací“) a obrábění se tak stává vícenásobně nevýhodné.



Obr. 10 Efektivní průměr frézy a efektivní průměr při naklonění osy

Zkracuje se trvanlivost břítu nástroje T , prodlužuje strojní čas obrábění, zhoršuje drsnost i kvalita obrobeného povrchu a hloubka ovlivněných podpovrchových vrstev v důsledku zvětšující se intenzity vnesených pnutí (reziduí) apod.

Obrázek 11a znázorňuje omezení tříosého obráběcího centra, jehož nemožnost naklonění vřetene stroje ($\beta = 0^\circ$) podstatně snižuje efektivní průměr frézy (zvláště při malých hloubkách řezu, resp. tloušťkách obráběných vrstev a_p). Podstatně se rovněž snižuje hodnota efektivní řezné rychlosti, viz matematické vztahy (1.3.3) a (1.3.5).

Obrázek 11b charakterizuje možnosti šestiosého HEXAPODU 1, kdy je naklonění ve všech směrech možné ($\beta \neq 0^\circ$), což zásadně rozšiřuje možnosti volby frézovacích drah a navíc také umožňuje „kulové“ fréze „nepracovat středem“, rozuměno při velmi malé až nulové řezné rychlosti v_c . Následující vztahy umožňují výpočet efektivního průměru frézy, který lze zvětšit vhodným nakloněním vřetene:

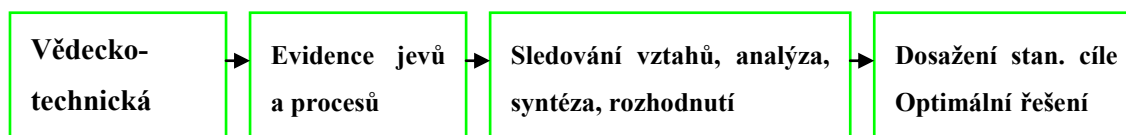
$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\beta \pm \arccos \left(\frac{d - 2 a_p}{d} \right) \right] [\text{mm}], \quad (1.3.5)$$

a tím rovněž dosažení vyšší efektivní řezné rychlosti (6.2)

$$v_{c,eff} = \frac{\pi \cdot n \cdot d}{1000} \sin \left[\beta \pm \arccos \left(\frac{d - 2 a_p}{d} \right) \right] [\text{m.min}^{-1}]. \quad (1.3.6)$$

Aplikace lineárního programování v technologii

Při řízení a rozhodování v oblasti vědecko-technologické činnosti je nutné sledovat určité procesy a jevy a analyzovat je s cílem dosažení optimálního průběhu jednotlivých procesů a dějů a určit jejich posloupnost tak, aby bylo dosaženo stanoveného cíle.



Obr. 11 Obecné schéma řešení úlohy

Lineární vědecko-technická analýza může být prováděná na základě solidního logického rozboru nebo rozhodnutí učiněného zkusmo, náhodně, intuitivně či na základě praktikizmu, anebo aplikací matematických metod.

Velmi často se tato zásadní rozhodnutí provádějí na základě zkušeností, intuitivně nebo i zkusmo. Pokud vychází ze solidní logické analýzy, mohou vést k vyhovujícím výsledkům, které nelze kritizovat, protože není známá optimální hodnota výsledku a tedy ani úroveň kvality takového rozhodnutí. Právě v oblasti technologie obrábění, při volbě rezných podmínek, se s tímto setkáváme často.

Jednou z možností jak dosáhnout přesných informací o kvalitě a úrovni řešení, je aplikace matematických metod na řešení daného problému a to zejména lineárního programování (LP). Jedná se o takový typ úloh, kde jsou počáteční podmínky dány určitým intervalem a mají tedy jistý stupeň volnosti. Extrémním případem je pak úloha, která nemá omezení, nebo naopak taková úloha, kde jsou počáteční podmínky dány tak, že vedou pouze k jednomu řešení.

Obvykle existuje více možností k řešení dané úlohy a cílem řešení je najít takové, které nejracionálněji využívají všech možností tak, aby výsledek byl optimalizován z hlediska požadovaných kritérií programování je jednou z nejjednodušších matematických disciplín, kterou lze realizovat v ekonomickém rozhodování.

S přihlédnutím k tomu, že značné množství vědecko-technických problémů lze popsat pomocí lineárních modelů nebo je na tyto vhodnou úpravou převést, používá se tato metoda často, ale i úspěšně. Nespornou výhodou je možnost použití více způsobů řešení, která jsou relativně jednoduchá a dají se snadno mechanizovat.

V lineárním programování se neřeší takové úlohy, které jsou specifikovány soustavou rovnic s jedním řešením. V tomto případě nelze posuzovat výhodnost jednotlivých hledaných proměnných z hlediska kritériální a není možné tedy hledat různé programy.

Má-li soustava skutečně presentovat problém lineárního programování, počet proměnných musí být vyšší než je počet omezujících podmínek.

Soustava m rovnic o n neznámých, kde $m < n$ může mít nekonečně mnoho řešení za předpokladu, že řešení existuje. Z praktického hlediska by pravděpodobně nebylo možné zjišťovat pro všechna řešení hodnotu kritériální funkce a ze všech možných kombinací zvolit takové, pro které kritériální funkce nabývá optimální hodnoty, tj. její hodnota je maximální nebo naopak minimální.

Kteroukoliv maximalizační úlohu lze převést prostou změnou znamének v kritériální funkci na minimalizační a naopak. Tento významný typ převodu má značný interpretační význam a to zejména v tom, že umožňuje najít nejvhodnější řešení a současně ocenit i disponibilní zdroje daného ekonomického systému.

Řešení, kde nejvýše m proměnných je různých od nuly a zbývající jsou rovny nule, nazýváme základním řešením. Počet základních řešení je dán výrazem:

$$\left[\begin{matrix} 1 \\ n \end{matrix} \right] = \frac{n!}{m! (n - m)!} \quad (1.3.7)$$

Je-li dáno m rovnic větší počet n neznámých, nabízí se dle vzorce (1.3.7) velmi mnoho řešení. Výběr nejvhodnějšího řešení je nesmírně pracný až nemožný. Proto je nutné zaměřit se na takové metody, které nám dovolí získat jednoduchým způsobem optimální řešení. Jedna z nejvhodnějších je metoda simplex.

Uvedená metoda řeší klasickou LP (pokud má úloha řešení), tedy nalezení extrému vícerozměrné reální funkce na uzavřeném konvexním polyedru, který je definován v daném prostoru soustavou lineárních nerovnic.

Podstatou metody je postup, kdy v první etapě nalezneme nějaké základní přípustné řešení úlohy. Je vhodné převést soustavu rovnic na kanonický tvar, odkud lze bezprostředně určit základní přípustné řešení soustavy.

Pod pojmem „kanonický tvar“ je chápána následující soustava m rovnic o n neznámých:

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1, m-1} \cdot x_{m-1} + a_{1, m+1} \cdot x_{m+1} &= b_1 \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \dots + a_{2, m-1} \cdot x_{m-1} + a_{2, m+1} \cdot x_{m+1} &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \dots + a_{m, m-1} \cdot x_{m-1} + a_{m, m+1} \cdot x_{m+1} &= b_m \end{aligned} \quad (1.3.8)$$

kde $x_1, x_2, \dots, x_{m-1}, x_{m+1}, \dots, x_n$ jsou základní proměnné, u kterých jsou koeficienty rovny jedné a v uvedené soustavě vytvářejí jednotkovou submatici. Proměnné $x_m, x_{m+1}, \dots, x_n$ se nazývají nezákladní proměnné. Základní řešení soustavy obdržíme, dosadíme-li za nezákladní proměnné soustavy nuly a v tomto případě platí, že základní proměnné se rovnají absolutním členům soustavy $x_m = b_1, x_{m+1} = b_2, \dots, x_n = b_m$.

Jestliže platí, že $b_1 \div b_m \neq 0$, nazýváme toto řešení *nedegenerovaným*, v případě, že alespoň jeden z absolutních členů soustavy se rovná nule, pak i příslušná základní proměnná se rovná nule a toto řešení se nazývá *degenerované*.

Ve druhé etapě přecházíme pomocí dovolených úprav od jednoho základního přípustného řešení k jinému základnímu přípustnému řešení s lepší hodnotou kritériální funkce tak dlouho, až dojdeme k optimálnímu řešení nebo zjistíme, že optimální řešení neexistuje.

Problémy LP, vedoucí k matematickému modelu typu $A \cdot x < b$ jsou nejjednoduššího případu, které lze simplexovou metodou řešit, protože zavedením přidavných proměnných získáme okamžitě soustavu rovnic v kanonickém tvaru. Řešení optimálních reálných podmínek ve stanovené oblasti přípustných řešení na základě určených omezení je však v našem případě složitější a vyžaduje matematický model typu $A \cdot x \leq b$ resp. $A \cdot x \geq b$.

Složitost modelu typu $A \cdot x \leq b$ spočívá v tom, že kanonický tvar soustavy rovnic má v matici soustavy jednotkovou submatici a jestliže v převodní soustavě rovnic takovou submatici nemáme, můžeme ji uměle vytvořit tak, že v určitých rovnicích přičteme nové pomocné proměnné.

Protože tato uměle vytvořená proměnná nemá žádný věcný význam, je nezbytné, aby se v konečném optimálním řešení nevyskytovala jako proměnná základní a aby se v průběhu řešení vyloučila a stala se proměnnou nezákladní, za niž dosazujeme nulu. Nepodaří-li se ji vyloučit, je nové řešení nepřipustné.

Vyloučení spočívá v zavedení sekundární kritériální funkce z' , která poslouží k minimalizování součtu pomocných proměnných. Nebude-li možné problém LP z hlediska sekundární účelové funkce optimalizovat, celkové řešení problému neexistuje. Bude-li však tato podmínka splněna, můžeme pokračovat ve zlepšování řešení podle původní kritériální funkce.

U úlohy typu $A \cdot x \geq b$ je zpravidla nutné zavedení obou druhů proměnných, tj. přídavných i pomocných, pokud se nechceme pomocným proměnným vyhnout (aplikace eliminační metody, anulace rovnice a vhodná úprava matice). Naše praktická úloha představuje matematický model, který neobsahuje pouze nerovnosti stejného typu ($\leq$ nebo $\geq$). Řešení lze provést tak, že se systém nerovností převede na soustavu rovnic zavedením přídavných proměnných a zavedou se pomocné proměnné u těch rovnic, kde přídavná proměnná má záporné znaménko. Koeficienty sekundární kritériální funkce obdržíme sečtením stejnohlých koeficientů u rovnic se záporným znaménkem přídavných proměnných.

Další postup je stejný jako u $A \cdot x \leq b$ tj. minimalizuje se sekundární kritériální funkce z' a v případě kladného výsledku lze pokračovat v řešení dle původní kritériální funkce. Přídavné proměnné se do kritériální funkce nepřidávají, mají tam nulové koeficienty. Naznačený postup řešení je časově velmi náročný. V praxi po sestavení omezujících podmínek a kritériální funkce se řešení provádí pomocí vhodných SW na počítači (např. STATGRAPHICS)³¹.

Má-li však konkrétní optimalizační úloha, ze současného neustále a rychle se měnícího výrobního prostředí, respektovat všechny podmínky, požadavky, možnosti, ale i zvyklosti provozovatele těchto zařízení, musí se tomuto prostředí maximálně přizpůsobit, avšak jen do té míry, při které nepřekročí mez, která by výsledek řešení „zkreslila“ natolik, že by jej přesunula mimo reálné (akceptovatelné) intervaly základních řezných podmínek, a to nejen z hlediska technických omezení, ale i konstrukčních požadavků (přesnost, kvalita, jakost) a neoddělitelného vztahu řezivost – obrobiteľnosť.

Náš případ však na základě podrobného zmapování jednotlivých specifík sledovaného výrobního prostředí (organizační zvyklosti, technická omezení, personální obsazení a momentální požadavky trhu) a hlubších teoretických znalostí (experimentální stanovení potřebných konstant a exponentů pro Taylorův vztah) posunul stávající úlohu do takové

situace, kdy soustava omezení má stejný počet proměnných jako omezujících podmínek a tudíž skutečně nereprezentuje problém lineárního programování.

Řešení pak „v takto připraveném zadání“ lze jednoduše, přesněji a přehledněji řešit následujícím způsobem.

Stanovení oblasti přípustných řešení na základě určených omezení

Pro případ frézování kovací zápustky, vyrobené ze zápustkové nástrojové oceli 19 663.3, zpracované dle ČSN 41 9663 a obráběné zápustkovou frézou s kulatým čelem (Sphericut U5286) s vysokým úhlem sklonu šroubovice $\omega = 30^\circ$ a úhlem čela $\gamma_o = 0^\circ$, $\alpha_o = 2^\circ$.

V námi určeném technologickém prostředí se uvažují jako proměnné pouze dva parametry řezných podmínek v_c , f , zatímco hloubka obráběné vrstvy a_p je považována za konstantní.

Pak lze vyjádřit *vliv omezujících podmínek* aplikací vybraných vztahů, tedy soustavou omezení. Experimentálně získané, statisticky zpracované a dlouhodobě sledované hodnoty v konkrétním výrobním prostředí jsou následující: $c_c = 2\ 865$; $x_{Fc} = 1,019$; $y_{Fc} = 0,56$; $z_{Fc} = -0,124$; $m = 1,4$; $R_{m,o} = 0,66$ Rm; Rm = 1 050 MPa; $x_v = 0,19$; $y_v = 0,11$; $c_v = 1\ 050$; $a_p = 0,14$ mm; $a_e = 0,11$ mm; průměr dvoubřité frézy $d = 6$ mm. Bez procesního média (tzv. „suché obrábění“).

1. Omezení výkonem obráběcího stroje (matematické zpracování viz²⁰):

Varianta WHN 13 CNC: Výkon hlavního motoru $P = 37$ kW

$$v_c^{1+x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \leq \frac{6 \cdot 10^4 \cdot P_c \cdot \eta}{c_c \cdot a_p^{x_{Fc}}} \quad (1.3.9)$$

Zavedením substitucí položíme $\log v_c = x_1$, $\log (10^2 f) = x_2$, $\log T_n = \lambda$. Následným dosazením a zlogaritmováním upravíme vztah

$$0,876 x_1 + 0,56 x_2 \leq b_1, \quad (1.3.10)$$

$$\text{pak } b_{1W} = \log \frac{6 \cdot 10^4 \cdot 37 \cdot 0,78}{2865 \cdot 0,14^{1,019}} + 0,56 \cdot 2 = 1,61 \quad \text{pro } x_1 = 0; \quad x_2 = 8,24$$

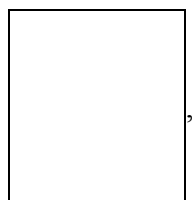
$$\text{pro } x_2 = 0; \quad x_1 = 5,26$$

Varianta HEXAPOD: Maximální výkon vřeteníku $P = 7,5$ kW

$$b_{1H} = \log \frac{6 \cdot 10^4 \cdot 7,5 \cdot 0,78}{2865 \cdot 0,14^{1,019}} + 1,56 \cdot 2 = 1,92 \quad \text{pro } x_1 = 0 ; \quad x_2 = 7$$

$$\text{pro } x_2 = 0 ; \quad x_1 = 4,47$$

2.-5. Omezení konstrukčními parametry obráběcího stroje:



(1.3.11)

kde - $f_{\min,o}$ - minimální pracovní posuv frézy, resp. posuvová rychlost v_f v [mm.ot⁻¹]

$f_{\max,o}$ - maximální pracovní posuv frézy, resp. posuvová rychlost v_f v [mm.ot⁻¹]

$v_{c,min}$ - minimální řezná rychlost frézy, pro daný efektivní průměr d_{eff} [mm.ot⁻¹]

$v_{c,max}$ - maximální řezná rychlost frézy, pro daný efektivní průměr d_{eff} [mm.ot⁻¹]

Varianta WHN 13 CNC:

Jestliže se minimální pracovní posuvy (rychlosti posuvu v_f) ve směrech X, Y, Z rovnají $f_{\min,p} = 40 \text{ mm.min}^{-1}$, minimální posuv na otáčku dostaneme při nastavených maximálních otáčkách WHN centra, tedy $n_{\max} = 2500 \text{ min}^{-1}$.

6. Minimální a maximální posuv na otáčku pak bude

$$f_{\min,o} = \frac{f_{\min,p}}{n_{\max}} = \frac{40}{2500} = 0,016 \text{ mm} \quad (1.3.12)$$

Maximální posuv na otáčku pak bude:

$$f_{\max,o} = \frac{f_{\max,p}}{n_{\min}} = \frac{6000}{260} = 23,077 \text{ mm} \quad (1.3.13)$$

Logaritmováním stonásobně zvětšených mezních hodnot posuvů na otáčku frézy pak dostaneme hodnoty pravých stran nerovností $b_{2,W}$, $b_{3,W}$:

$$x_2 \geq b_{2W} \quad \text{kde} \quad b_{2W} = \log 10^2 f_{\min,o}, \quad b_{2W} = \log 10^2 \cdot 0,016 = 0,204$$

$$x_2 \leq b_{3W} \quad \text{kde} \quad b_{3W} = \log 10^2 f_{\max,o}, \quad b_{3W} = \log 10^2 \cdot 23,077 = 2,364$$

Varianta HEXAPOD

Minimální posuv na otáčku pak bude:

$$f_{\min,o} = \frac{f_{\min,p}}{n_{\max}} = \frac{400}{30\,000} = 0,0133 \text{ mm.}$$

Maximální posuv na otáčku pak bude:

$$f_{\max,o} = \frac{f_{\max,p}}{n_{\min}} = \frac{40\,000}{300} = 133,33 \text{ mm.}$$

Obdobně jako u WHN 13 CNC:

$$x_2 \geq b_{2H} \quad \text{kde} \quad b_{2H} = \log 10^2 f_{\min,o}, \quad b_{2,H} = \log 10^2 \cdot 0,0133 = 0,125,$$

$$x_2 \leq b_{3H} \quad \text{kde} \quad b_{3H} = \log 10^2 f_{\max,o}, \quad b_{3,H} = \log 10^2 \cdot 133,333 = 4,12.$$

Určení mezních hodnot řezných rychlostí obou variant:

Varianta WHN 13 CNC:

Minimální řezná rychlost frézy $v_{c,\min}$, pro daný efektivní průměr d_{eff} v [m.min⁻¹]

$$x_1 \geq b_{4W} \quad \text{kde} \quad b_{4,W} = \lg \frac{\pi d_{eff} \cdot n_{\min}}{1000} = \lg \frac{\pi \cdot 2,154 \cdot 260}{1000} = 1,245$$

Maximální řezná rychlost frézy $v_{c,\max}$, pro daný efektivní průměr d_{eff} v [m.min⁻¹]

$$x_2 \leq b_{5W} \quad \text{kde} \quad b_{5,W} = \lg \frac{\pi d_{eff} \cdot n_{\max}}{1000} = \lg \frac{\pi \cdot 2,154 \cdot 2500}{1000} = 2,23$$

Varianta HEXAPOD

Jelikož konstrukce šestiosého obráběcího centra umožňuje naklonění vřetena, jehož hodnota je v tomto případě $\beta = 20^\circ$, efektivní průměr a tedy i rychlost lze vypočítat dle vztahů (1.3.5) a (1.3.6):

$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\beta \pm \arccos \left(\frac{d - 1,4 a_p}{d} \right) \right] = 5 \cdot \sin \left[20 \pm \arccos \left(\frac{5 - 1,4 \cdot 0,14}{5} \right) \right] = 4,9 \text{ mm}$$

Dosazením efektivního průměru vykloněním vřetena obdržíme hodnoty $b_{4,H}$ a $b_{5,H}$

$$x_1 \geq b_{4H} \quad \text{kde } b_{4,H} = \text{og} \frac{\pi \cdot d_{\text{eff}} \cdot n_{\text{min}}}{1000} = \text{og} \frac{\pi \cdot 3,9 \cdot 300}{1000} = 1,565$$

$$x_2 \leq b_{5H} \quad \text{kde } b_{5,H} = \text{og} \frac{\pi \cdot d_{\text{eff}} \cdot n_{\text{min}}}{1000} = \text{og} \frac{\pi \cdot 3,9 \cdot 30\,000}{1000} = 1,565$$

7. Omezení z hlediska požadované drsnosti obrobené plochy (platí pro obě varianty):

$$\boxed{\phantom{f_{Ra, \max} = 1,1366 \cdot r_e^{0,6869} \cdot R_a^{0,5131}}} \quad (1.3.14)$$

kde $f_{Ra, \max}$ je rovno vztahu $f_{Ra, \max} = 1,1366 \cdot r_e^{0,6869} \cdot R_a^{0,5131}$

Po dosazení do rovnice určující požadovanou drsnost $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ bude:

$$b_6 = \text{og} 10^2 \cdot 0,1366 \cdot 2,4^{0,6869} \cdot 3,2^{0,5131} = 0,7036$$

Toto omezení je vhodné kontrolovat, a případně i korigovat:

Posunutí frézy b_r s „kulatým čelem“ lze vypočítat prostřednictvím vztahu:

$$b_r = 2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (r - a_p)} = 2 \cdot \sqrt{0,14 \cdot (6 - 0,14)} = 0,81 \text{ mm.}$$

Z předcházející rovnice plyne, že maximálnímu možnému (myslí se tím pro daný průměr frézy) posunutí $b_r = 6 \text{ mm}$ odpovídá hloubka řezu $a_p = 3 \text{ mm}$. Tomuto posunutí (kroku frézy) pak odpovídá dosažená teoretická drsnost $R_{th} = 3 \mu\text{m}$.

Jelikož však dokončovací přídavek je „předurčen“ technologickým postupem neboli tzv. „strategií frézování“ na hodnotou $a_p = 0,14 \text{ mm}$, bude se teoretická drsnost rovnat hodnotě vypočtené prostřednictvím následujícího matematického vztahu:

$$R_{th} = \frac{d}{2} - \sqrt{\frac{d^2 - b_r^2}{4}} = \frac{6}{2} - \sqrt{\frac{6^2 - 0,81^2}{4}} = 1,139 \mu\text{m.} \quad (1.3.15)$$

Jelikož je teoretická hodnota drsnosti ve sledovaném směru mnohonásobně menší než výkresově předepsaná, což je značně ovlivněno malou hodnotou tloušťky obráběné vrstvy a_p , požadavku konstrukce vyhovuje, i když praxe dokazuje, že skutečná dosahovaná drsnost je zpravidla větší, a to přibližně o 20% než předpokládaná vypočtená teoretická hodnota R_{th} .

8. Omezení řezivosti nástroje a obrobitelnosti materiálu obrobku komplexním Taylorovým vztahem:

$$v_c \cdot f^{y_v} = \frac{c_v}{a_p^{x_v}} \cdot T^{-\frac{1}{m}} \quad (1.3.16)$$

Po zlogaritmování

$$x_1 + y_v \cdot x_2 = b_7 - \frac{1}{m} \lambda, \quad (1.3.17)$$

$$\text{kde} \quad b_7 = \lg \frac{c_v}{a_p^{x_v}} + y_v \cdot \quad (1.3.18)$$

Po dosazení do vztahu (1.3.18) vypočteme

$$b_7 = \lg \frac{1050}{0,14^{0,19}} + 2 \cdot 0,11 = 3,4$$

Pro „teoretickou“ trvanlivost bříty $T = 1$ minuta je $\lambda = 0$, (dle substituce $\lambda = \lg T$). Tímto se matematický vztah (1.3.17) zjednodušuje na:

$$x_1 + y_v \cdot x_2 = b_7 \quad (1.3.19)$$

Vázanost řezných podmínek na posuv na zub

U vícebřitých rotačních nástrojů je posuv na zub f_z dán vztahem

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} \quad [\text{mm}] \quad (1.3.20)$$

Posuv na otáčku f je určen následujícím vztahem

$$f = f_z \cdot z \quad [\text{mm}] \quad (1.3.21)$$

Prostřednictvím jednoduchého matematického vztahu (1.3.5), ukázkového příkladu a technických parametrů obráběcího centra WHN 16 CNC lze prověřit použitelnost nabízené maximální posuvové rychlosti:

$$f_z = \frac{12\,000}{2 \cdot 8\,000} = 1,75 \text{ mm}$$

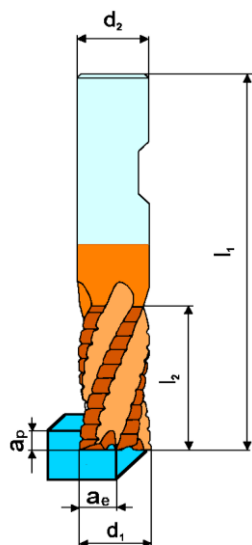
Možný posuv na zub však nelze akceptovat především z pevnostního důvodu a dosahované drsnosti. U klasického rovinného frézování se hodnoty posuvu na zub běžně pohybují v intervalu $f_z = 0,04 - 0,15 \text{ mm}$. Literatura¹ specializující se na 2D-3D frézování HSC doporučuje i dokazuje vhodnost situovat interval do hodnot $f_z = 0,05 - 0,25 \text{ mm}$, a pro HVC $f_z = 0,1 - 0,4 \text{ mm}$.

V uváděném případě lze na zvoleném obráběcím centru pro nerotační součásti použít čtyřzubou zápustkovou frézu s kulatým čelem 5384 FRAISA br MICRO GRAIN a tímto snížit otáčky na čtvrtinu maximálních možných.

$$f_z = \frac{3\,000}{4 \cdot 8\,000} = 1,094 \text{ mm}$$

Takto stanovené řezné podmínky se již přibližují hodnotám posuvu na zub (s klesajícím průměrem frézy se již hodnota posuvu na zub f_z přibližuje ke spodní hranici intervalu, a naopak), které jsou doporučovány výrobcem těchto nástrojů. Nesplňují však požadavky kladené na vysokorychlostní ani vysoko-objemové frézování.

Řezné podmínky a objemový úběr



Vědecko – výzkumné experimenty prováděné na Technické univerzitě v Darmstadtu na základě četných seriózních měření prokázaly, že nejpříznivější průřez odřezávané třísky, a to hned z několika hledisek, je průřez čtvercový ($a_p = a_e$). Tento průřez odebírané třísky, kdy je hloubka řezu (tloušťka odebírané vrstvy) a_p rovna šířce řezu a_e , je velmi příznivý a již také mnohdy používaný u „vysoko-objemové“ HVC technologie, pokud to však technická, ale i jiná omezení technologům umožní.

Obr. 12 Efektivní průměr stopkové frézy při obrábění

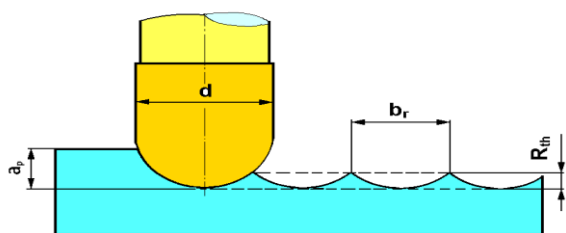
Ideální se však ukazuje „sladit“ „základní řezné podmínky“ tak, aby byl odebíraný objem třísky kubického tvaru, tedy $a_p = a_e = f_z$. V mnoha praktických případech je však tento nesmírně náročný předpoklad jen velmi obtížně realizovatelný, což však neznamená, že by se alespoň o jeho přiblížení nemělo usilovat. Úběr materiálu za jednotku času Q lze popsat následujícím matematickým vztahem:

$$Q = \frac{v_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} \quad [\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]. \quad (1.3.22)$$

Řeznými podmínkami stanovený čtvercový průřez, nebo ve zvlášť příznivých případech dokonce odebíraný kubický objem (při frézování), snižuje na nejnížší možnou mez (jsou-li dosaženy řezné podmínky, splňující kritéria HSC) požadovaný efektivní výkon (P_e [kW]) včetně stroje s ohledem na odebrané množství materiálu obrobku za čas.

Závislost řezných podmínek na dosahované drsnosti

Žádáme-li po progresivním obrábění, aby operace frézování byla finální, jeden z ostrých požadavků bude dosahovaná drsnost obrobené plochy. U 2D – 3D frézování to znamená, že závěrečné operace, jako „šlichtování“ Z – konstant, šlichtování - kopírování, 3D - křivky-parallelní kouty a zbytkový materiál kontura, obráběné převážně stopkovými frézami s kulatým čelem budou muset splňovat konstrukcí předepsanou drsnost povrchu. Hloubka třísky a_p je zpravidla dána přídatkem na obrábění.



Vznikající teoretická drsnost R_{th} je pak určena průměrem frézy s kulatým čelem d a také krokem zápustkové frézy b_r . Je zřejmé, že s větším průměrem frézy a rostoucím krokem se zkracuje celková trajektorie nástroje, a tím i strojní čas.

Obr. 13 Schematický rozbor vzniku teoretické drsnosti

Otázkou však je, do jaké míry se rostoucí průměr frézy a krok frézy projeví na teoretické drsnosti a na drsnosti výsledné. Prostřednictvím následujících matematických vztahů lze tuto závislost vypočítat. Teoretická drsnost je tedy rovna

$$R_{th} = \frac{f}{2} - \sqrt{\frac{d^2 - f_r^2}{4}} \quad [\mu\text{m}]. \quad (1.3.23)$$

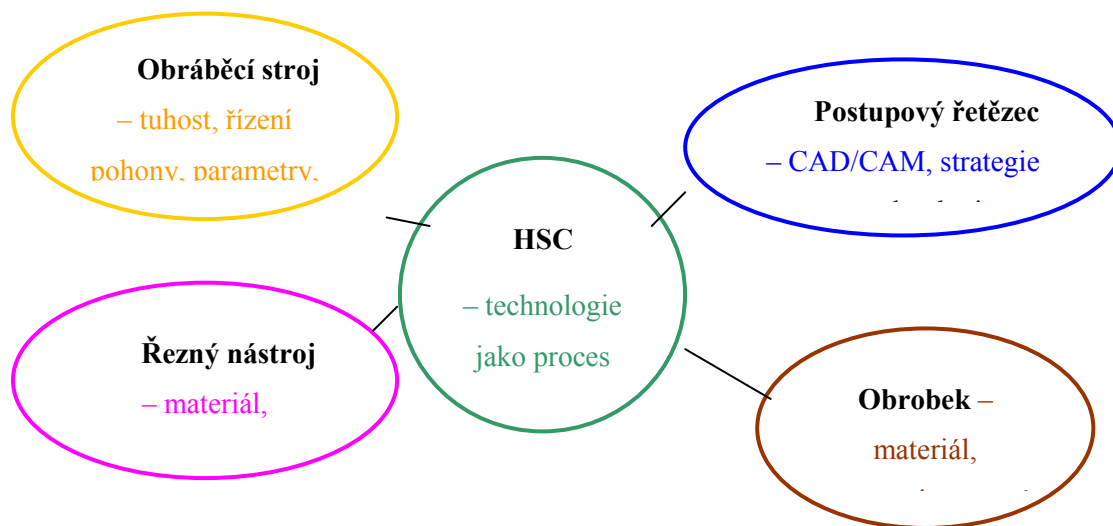
Krok kulové frézy (frézy s kulatým čelem) lze popsat matematickým vztahem

$$b_r = 2 \sqrt{a_p \cdot \left(\frac{d}{2} - \sqrt{\left(\frac{d}{2} \right)^2 - a_p^2} \right)} \quad [\text{mm}]. \quad (1.3.24)$$

Na dosaženou drsnost obrobeneho povrchu bude mít v kolmém směru také vliv posuv na zub f_z , vzájemný poměr hloubky řezu a_p a šířky řezu a_e , stav břitů frézy v průběhu doby záběru, vlastní kmitání soustavy, vyložení, tuhost a „vyváženost“ řezného nástroje. V neposlední řadě také otáčky n a stav vřetene a momentální úroveň seřízení obráběcího stroje.

Požadavky na související činnosti

V souvislosti se značným odlišením HSC obrábění od konvenčního, jsou kladeny velmi „ostré“ požadavky na související činnosti.



Obr. 14 Faktory ovlivňující související činnosti na HSC – proces

Jen úplné zajištění a dodržení všech faktorů, a s nimi souvisejících činností, nás může přivést k zásadním, očekávaným výhodám, které s sebou HSC nesporně přináší.

Požadavky na stroje pro HSC

Stroj: Vysoké řezné rychlosti vyžadují vysoké otáčky vřetena, a tím rovněž vysoké posuvové rychlosti, které přímo souvisejí s posuvem na zub. Tuhé vřeteno musí zajišťovat nejen vysoké otáčky, ale mít k dispozici, velký, plynule říditelný rozsah při dostatečném kroutícím momentu. Toto si vyžaduje speciální ložiska trvale snášející nejvyšší oběžné rychlosti (např. elektromagnetická nebo keramická).

Přesné upnutí nástroje s minimální tolerancí obvodového házení. Zkušenosti vedou k tomu, že se ukazuje jako zvlášť vhodné upínat stopkové frézy do dvou druhů sklíčidel, a to do smršťovacího sklíčidla nebo do sklíčidla s hydraulickým upínáním. Oba způsoby zajišťují absolutní vyváženost s minimálními odchylkami obvodového házení.

Pohony pro osy musí zajišťovat kromě vysokých posuvových rychlostí rovněž extrémní hodnoty zrychlení a zpždění, se zajištěním přesné naprogramované trajektorie. To vyžaduje

konstrukčně i materiálově zajištěnou minimalizaci pohybujících se hmot s vynikající schopností tlumení kmitů. Velmi vysoké oběžné rychlosti se dají realizovat pouze dostatečně rychlými řídicími jednotkami s nejkratšími dobami zpracování záznamu.

Pro zvláště komplikované geometrie forem, jsou zapotřebí programy náročné na soubory dat, vyžadující značnou kapacitu paměti. Bezpečnosti musí být u HSC - strojů přiřazena zvláštní pozornost. „Absolutní kapotáž“ obráběcího centra musí při možných kolizích úplně pohltit „vystřelené“ částice.

V důsledku enormních obvodových rychlostí působí na rotující části značné odstředivé síly. Při případném roztržení rotujícího nástroje (z příčiny kolize, či vnitřní vady), získávají jednotlivé úlomky obrovskou kinetickou energii. Nesmí být rovněž podceněna otázka zdroje vzniku hluku (pohony, vřeteno, chlazení, tvorba a odchod třísky) a jeho tlumení, jakož i tvorbě prachu a mlhy.

Požadavky na nástroje pro HSC

Při obrábění forem a zápuštěk, jejichž předpokládaná a nekompromisně vyžadována funkčnost přímo vyžaduje velmi pevný, tvrdý a současně houževnatý materiál ($R_m = 1600 - 1800 \text{ N.mm}^{-2}$, HRC 48-52), dochází k tomu, že s rostoucí řeznou rychlostí přetvárný odpor roste. Proto musí být mechanické zatížení břitů sníženo redukcí přísuvu a posuvu na zub. K tomuto přistupuje skutečnost, že je břit nástroje s přibývajícím radiálním přísuvem a_e déle v záběru, a tím je tepelně značně namáhán.

Proto by radiální přísuv (šířka řezu) neměl u vysokorychlostního frézování nástrojové oceli překračovat, v zájmu hospodárné trvanlivosti 5 až 10 % průměru nástroje. Obecně při HSS nástrojové oceli platí následující zásada: Čím vyšší je volena řezná rychlost, tím nižší má být přísuv. Celkově lze tedy konstatovat, že změna tvorby třísky a jejího odchodu jsou klíčovými body vysokorychlostního frézování.

Nesmí se ovšem opomenout na důležitou závislost vztahu, řezný materiál - obráběný materiál, tedy závislosti mezi řezivostí a obrobitelností. Stav tepelného zpracování zde neztrácí na významnosti a kvalita výbrusu a případná povrchová úprava nástroje taktéž. Je vhodné zdůraznit, že mezi oblastí konvenčních řezných rychlostí a oblastí vysokorychlostní se

nachází pro mnohé obráběcí operace zóna řezných rychlostí, v níž není hospodárné obrábění možné, poněvadž efekt změněné tvorby třísky se ještě neuplatní.

Vzhledem k rotačnímu pohybu nástroje, obrábějícímu při velmi vysokých otáčkách, rozpínaného odstředivou silou, tepelně zatíženého a pevnostně mimořádně namáhaného, se vyžaduje kromě vysokých fyzikálních a mechanických vlastností také geometrická přesnost a homogennost struktury ve vztahu k možnému nerovnoměrnému rozložení hmoty a následnému rozkmitání.

K prodloužení potřebné trvanlivosti břitů při obrábění zvláště obtížně obrobitelných materiálů je vhodné odlehčit zatížení řezné hrany vhodným povlakem, naneseným metodou PVD (např. TiAlN zvláště odolný proti opotřebování a TiCN se vyznačuje vysokou termickou stabilitou).

Optimální řezná geometrie (nástrojová i pracovní geometrie) je speciální záležitostí systematického a dlouhodobého vývoje, ověřovaného po celá desetiletí ve výzkumných experimentálních centrech i v mnohých provozech. Dá se s téměř 100% jistotou konstatovat, že je optimální a speciálně v HSC procesu její „funkční úhly předurčují předpokládaný směr odchodu třísky“.

1.4. Činnosti provázející současné výrobní prostředí



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Definovat limitující faktory výroby
- Popsat princip poptávkového řízení

Současný globální trh nutí i „dobře zavedeného“ výrobce vlastních finálních výrobků k nepřetržitému inovačnímu procesu, natož pak např. výrobce nástrojů a náradí, kteří jsou o svou existenci, tedy udržení stávajícího objemu výroby, nuceni permanentně bojovat. Chtějí-li svou, na základech technicko-ekonomických předpokladů a rozborů, plánovanou produkci a případný zisk prostřednictvím externí objednávky rozšířit, vyplývají pak pro ně, ale i pro potenciálního zákazníka určité omezující faktory, které je nutno před uzavřením nové smlouvy prověřit a posoudit.

Limitující faktory

- Strojový park a jeho technologické parametry, umožňující realizaci zakázky v požadované přesnosti a jakosti.
- Výrobní kapacity, které dávají společnosti předpoklady realizovat zakázku v požadovaném množství a termínu, bez ohrožení výroby stálých zakázek.
- Ekonomické faktory, určující, bude-li případná realizace zakázky pro výrobce výhodná z hlediska zisku.

Je žádoucí si uvědomit, že při hledání cest, jak snížit výrobní náklady jsme vždy limitováni úrovní strojního vybavení daného provozů. Investice do nového stroje či jeho vybavení, u kterého musí být zaručena jeho návratnost, jsou v současnosti značné. Všechny faktory, které hrají významnější roli při přijímání externí zakázky je nutno předem posoudit. Jde o vytvoření jednotného postupu, který v rámci daných možností zaručí kompetentnost rozhodnutí o přijetí nebo odmítnutí zakázky. Pro tento účel je zpracována obchodním úsekem organizační směrnice jakosti, která obsahuje:

Přezkoumání smlouvy

Tato směrnice určuje „zásady činnosti přezkoumání smlouvy od kontaktu se zákazníkem pro uzavření jednání o dodávce předmětu jeho zájmu po uzavření a vyhodnocení obchodního případu“.

Poptávkové řízení

Do realizace obchodního případu samostatně vstupují tři úseky, které zaujmají své stanovisko v „poptávkovém řízení“.

1. **Obchodní úsek (OÚ)** – nesoucí celou odpovědnost za činnosti, které jsou popisovány v této organizační směrnici. Ve vlastním obchodním případě pak doplní poptávkový list (PL) o náklady na obaly, dopravu a ostatní obchodní náklady. Samostatnou složkou je pak přiměřený zisk.
2. **Výrobní úsek (VÚ)** – posoudí volné kapacity pro výrobu předmětu poptávky v požadovaném termínu a rozhodne o středisku pro výrobu poptávky. Ten, na základě kalkulace, stanoví předběžný čas výroby a předpokládaný termín výroby. Vyplněný PL pak předá technickému úseku.
3. **Technický úsek (TÚ)** – Posoudí technologické a materiálové požadavky poptávky, stanoví předpokládaný technologický postup a provede kalkulaci spotřeby výrobního času v normohodinách, resp. v „normominutách“. Současně stanoví materiálové náklady, případně další jiné náklady.

Matice odpovědnosti a spolupráce

Matice odpovědnosti a spolupráce jasným a přehledným způsobem určuje, kdo, ve které fázi a jakým způsobem nese zodpovědnost za správný průběh. Uvádá také, kde je nutná spolupráce mezi subjekty, a kdo má disponovat určitými informacemi.

Tabulka 1.4.1 Matice odpovědnosti a spolupráce

Matice odpovědnosti a spolupráce	Zákazník	OÚ	TÚ	VÚ	ÚJ
Poptávka zákazníka	Zodpovídá	S			
Evidence poptávky		Z			
Upřesnění poptávky – spec. požad. na jakost	(Z)	Z			
Vystavení poptávkového listu		Z, OÚ			
Posouzení poptávky	Informován	S	Z	Z	S
Stanovení nákladů		S	Z	S	S
Stanovení ceny	Informován	Z			
Vystavení nabídky	Informován	Z			
Vystavení obchodní smlouvy	(S)	Z			
Upřesnění a uzavření obchodní smlouvy	(Z)	Z			
Přenos smluvních podmínek		Z			
Rozprac. smluv. podmínek do dokumentace			Z	S	S
Realizace obchod. případu dle smluv. pod.			S	Z	S
Kontrola průběhu plnění smluv. podmínek		Z	S	S	S
Ukončení obchodního případu		Z		S	S
Informace o spokojenosti zákazníka	Spolupráce	Z			

ÚJ – úsek jakosti, TÚ – technický úsek

Příklad možného určení výrobních nákladů

Rozbor výrobních nákladů lze předvést na konkrétní zakázce. Jedná se o lisovací nástroje na výrobu plechového výlisku označeného: díl č. 1JO 804 796A. Výztuha je určená pro automobily koncernu VW. Dále je zadána výroba i konstrukce kontrolního přípravku pro tuto výztuhu. Součástí má být i společná deska pro nástroje 2, 3 a 4, které „pracují na jeden zdvih“.

Popis zakázky

K prvnímu kontaktu mezi oběma subjekty dochází prostřednictvím faxové poptávky na výrobu lisovacích nástrojů. Jedná se o následující nástroje určené pro čtyři operace:

1. operace Tah I. LOO 14 101
2. operace Tah II. – LOO 14 102
3. operace Střih rozvinutého tvaru
4. operace Kalibrace – LKN 1030 a společnou Upínací desku.

Další požadavky:

- Maximální spotřeba materiálu nesmí přesáhnout $0,48 \text{ kg.kus}^{-1}$
- Pro činné nástroje použít ocel DIN včetně povlakování nebo plynové pružiny
- Předpokládaná produkce $540\,000 \text{ ks.rok}^{-1}$
- Maximální tolerance výlisku 70% tolerance výkresové.

Lisování bude prováděno na lisu LKT 250. CAD data byly zaslány prostřednictvím elektronické pošty. V souladu s Organizační směrnicí jakosti dochází po posouzení úplnosti poptávky k vystavení Poptávkového listu. Technický a výrobní úsek prostřednictvím tohoto PL zaujímají stanovisko k možnosti realizace zakázky. Po proběhnutí této fáze se PL vrací vedoucímu obchodního úseku. V obou případech je deklarována realizovatelnost zakázky.

Výrobní úsek uvádí nejbližší možný termín zhotovení do jednoho měsíce po obdržení objednávky a dodání výkresu. Součástí této fáze poptávkového řízení je i stanovení předběžné ceny zakázky, která vychází z nákladů na materiál. Dále se stanoví předběžný počet normohodin pro výrobu i pro konstrukci. Určení předběžného počtu normohodin vychází ze zkušeností technologa a na základě podobnosti (porovnání) s již realizovanými zakázkami. Přesné stanovení potřebných normohodin proběhne až při realizaci na základě dodané dokumentace a po uzavření obchodní smlouvy.

Tabulka 1.4.2 Stanovení předběžné ceny externí zakázky

Číslo operace	Nástroj	Rozměr D x š x v [mm]	Čas [Nhod]	Materiál [Kč]	Konstrukční hodiny
010	LRP	1250x900x580	1 180	380 000,-	250
020	LOO	550x450x360	420	51 000,-	120
030	LOO	500x420x360	470	48 000,-	120
040	LKN	500x400x360	530	56 000,-	90
Společná deska		1350x800x60	335	45 000,-	45
Společná deska		1350x800x60			40
Celková suma			2 935	580 000,-	665

Předběžná kalkulace ceny:

Konstrukce: 665 x 220 = 146 000,- (sazba 220,- Kč za normohodinu)

Výroba: 2 936 x 350 = 1 027 250,- (sazba 350,- Kč za normohodinu)

Materiál: 580 000,-

Celkové náklady: 146 300 + 1 027 250 + 580 = 1 753 550,- Kč

Po zaokrouhlení vzhledem k určité rezervě je stanovena předběžná cena: **1 850 000,- Kč**

Faxovým sdělením je tato přibližná cena (bez DPH) sdělena zákazníkovi jako nabídka. V dalším průběhu dochází k upřesnění některých požadavků na technickou a kvalitativní stránku výrobku. Proto dochází ze strany Nářadovny k přehodnocení cenové nabídky, která se zvýší o **110 000,- Kč**. Celková cena nástrojů je stanovena na **1 960 000,- Kč + DPH**. Tato cenová nabídka je pak ze strany odběratele akceptována. Dochází tak k vystavení objednávky, která mimo jiné obsahuje platební podmínky:

- ✓ 30% po schválení konstrukce,
- ✓ 50 % po ukončení výroby nástrojů a předání měřicího protokolu,
- ✓ 20 % po převzetí nástrojů, včetně předávacího protokolu.

Na základě této objednávky je vyhotovena Smlouva o dílo. Právní vztahy z této smlouvy nebo související s ní se řídí Obchodním zákoníkem č. 513/1991 sb.

Automatizovaným 3D frézováním lze obrábět nejnáročnější a nejobtížnější geometrické tvary obrobků nejrůznějších materiálů, od umělých pryskyřic pro modely a měrky, přes grafit, hliníkové slitiny, bronz, křehké, tvrdé, kalené, velmi pevné, ale i houževnaté materiály.

Vlastnosti obráběných materiálů HSC technologií

Zvlášť lisovací formy a především kovací zápustky se vyrábějí z vysoce kvalitních nástrojových ocelí, jejichž speciální složení a cílené tepelné zpracování jim zaručuje vysoké mechanické vlastnosti, které však zhoršují jejich obrobitelnost.

Pro názornost bude vhodné uvést příklad technologického postupu tepelného zpracování materiálu, ze kterého se má vyrobit (vyfrézovat) kovací zápustka. Chemické složení a tepelné zpracování válcové tyče tvářené za tepla, budoucího zápustkového bloku, může např. probíhat následovně:

Zápustková nástrojová ocel 19 663 dodávaná jako tyč (válcovaná za tepla) nebo jako výkovek (kovaný za tepla). Dle normy ČSN 41 9663 má Ni-Mo-Cr-V ocel hodnotu pevnosti v tahu 1 275 MPa pro buchary, zatímco zápustky pro protlačování mají hodnotu tahové pevnosti 1 595 MPa.

Tab 1.4.3 Chemické složení zápustkové oceli

Chemické složení - rozbor tavby [%]								
C	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	Si
0.5	0.5	0.9	1.5	0.3	0.1	max	max	0.3
až								až
0.6	0.9	1.3	1.9	0.5	0.25	0.03	0.03	0.6

Ve stavu žíhaném naměkko dosahují oceli 19 663.3 tvrdost max. 225 HB a v kaleném stavu oceli 19 663.4 min. 52 HRC.

Charakteristika zápusťkové oceli:

Ni-Cr-Mo-V ocel ke kalení v proudu vzduchu nebo v oleji s velkou prokalitelností. Má vysokou tvrdost po kalení, dobrou odolnost proti popouštění, dobrou pevnost za tepla a houževnatost. Dobře odolává prudkým změnám teplot a tepelné únavě. Je dobře tvárná za tepla.

Tabulka 1.4.4 Doporučené teploty pro tváření a tepelné zpracování

Způsob	Teplota	Postup
Kování	1 100 - 850° C	pomalou ochlazovat na vzduchu nebo lépe např. v suchém popelu
Žihání naměkko	680 - 700° C	několik hodin prohřát (dle velikosti kusu do 4 hodin) a ochlazovat v peci
Žihání ke snížení pnutí	600 - 650° C	1 až 2 hodiny prohřát a pomalu ochlazovat v peci
Kalení na vzduchu	870 - 900° C	větší a členitější nástroje
Kalení v oleji	840 - 870° C	ochladit v oleji asi na 100° C
Popouštění na vzduchu či v oleji	450 - 650° C	ochlazovat na vzduchu, stupeň popouštění se řídí tvrdostí a houževnatostí nástroje

Vhodnost použití:

Nástroje pro tváření za tepla, jakými jsou zápusťky všech velikostí, zejména s pevností přes 1 275 MPa, pro buchary a kovací lisy, vložky zápusťek, nástroje kovacíh strojů, nástroje pro protlačování neželezných kovů, průtláčnický s pevností přes 1 595 MPa apod.

Jejich zušlechťování se provádí kalením a následným popouštěním na teplotu, při které pevnost oceli z kaleného stavu značně poklesne, ale stoupne tím houževnatost, tažnost a pevnost a zhorší se obrobitelnost.

Teprve pak se třískovým obráběním, které začíná hrubováním, pokračuje hrubováním zbytkového materiálu, obráběním načisto, obráběním zbytkového materiálu načisto a obráběním 2–3D křivek (tedy rovinných a prostorových křivek), frézováním vybrání, obráběním tangentně ke křivce a obrobením zbytkového materiálu podél kontury, vytváří postupným frézováním potřebný tvar kovací zápusťky.

Postupový řetězec

Efektivnost výrobního postupu vyžaduje obsáhlou globální znalost technologie třískového vysokorychlostního obrábění. Pro reálnost splnění náročné zakázky v požadovaném čase je nezbytný výkonný CAD/CAM systém.

Zejména při stavbě nástrojů a forem je prioritní vystihnout komplexně geometrie součástí (polohy volného tvaru), které nejsou myslitelné ani realizovatelné bez podpory výkonné výpočetní techniky.

V zájmu hospodárného obrábění jde o snahu zkracovat hlavní časy s co možná nejdelší trvanlivostí řezného nástroje. Především z těchto důvodů musí být strategii frézování věnována zvláštní pozornost. Právě v této fázi technologie výroby je značný optimalizační potenciál, který, bude-li správně využit, může šetřit nástroj i stroj, ale i finanční prostředky.

Vedle vytváření ideálních podmínek pro použití (přísuvy, směr otáčení, úhel náběhu) platí, že vhodnou volbou frézovacích drah je možné docílit téměř neměnného zatížení nástroje, a to prostřednictvím eliminace všech prudkých změn směru (žádné trhavé pohyby).

Dále se jedná o snahu vytvořit tzv. kontinuální obrábění bez přerušení (žádné chody naprázdno). Těmto předpokladům vyhovuje sousledné (souhlasné) frézování.

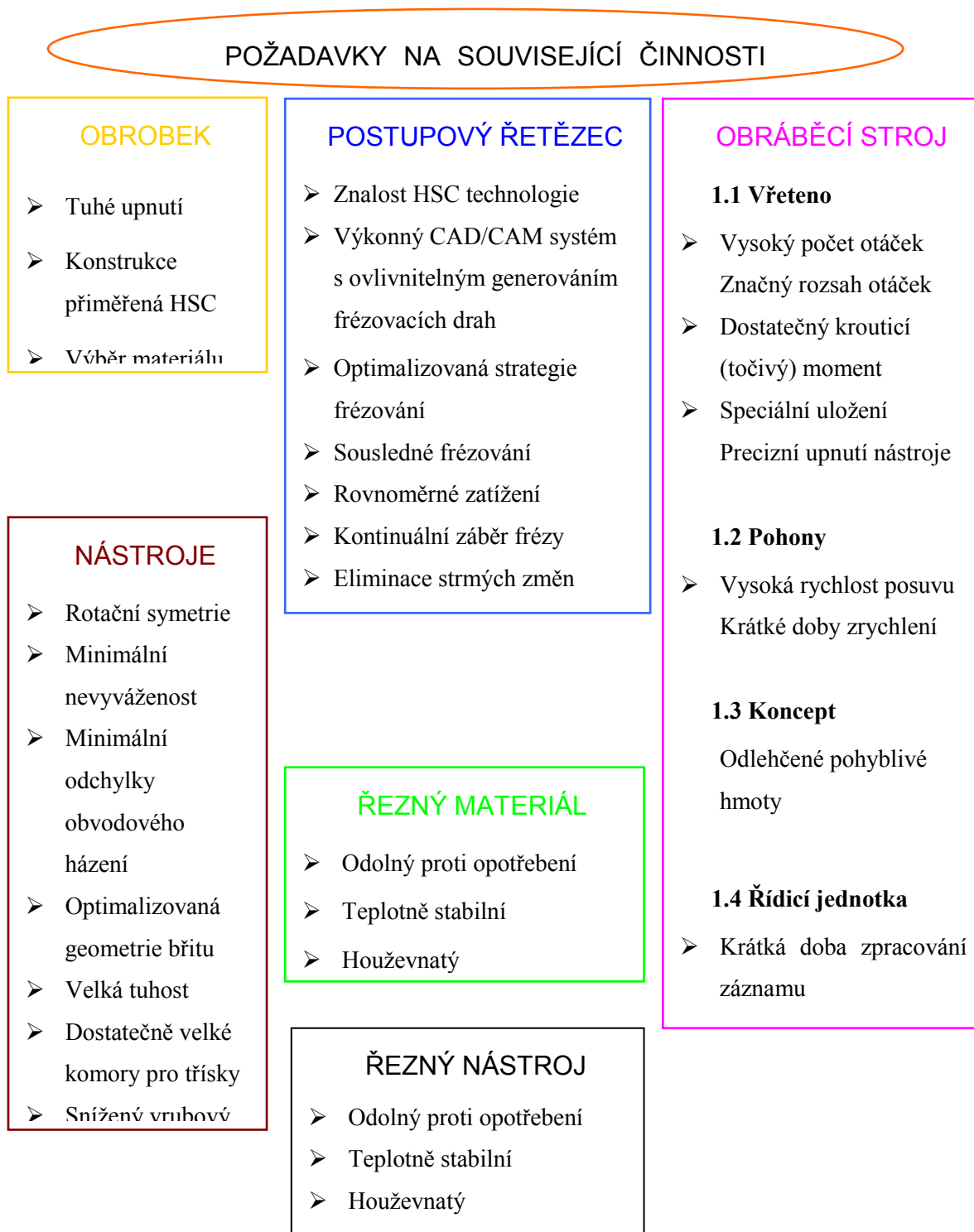
Hrubování součástí formy má probíhat výhradně v rovinách s konstantní Z – souřadnicí (Z - osa vřetena stroje), tedy na spirálovitých drahách přizpůsobených obrysu (frézovací cykly pro vnitřní vybrání). Velmi důležité je zařiznutí, které se provádí ve tvaru kruhu (z vnějšku), resp. v diagonálním nebo spirálovitém zápichu (tzv. kruhová – Helix-interpolace) u uzavřených obrysů.

Při **obrábění načisto** by frézovací dráhy měly rovněž ležet paralelně ke konečnému obrysu (volné tvary) a spirálovitě v rovinách. V zájmu optimální drsnosti povrchu a přesnosti rozměrů musí být různé „partie“, jako obrys tvaru, vnitřní zaoblení a roviny, posuzovány, optimalizovány a obráběny jednotlivě.

Požadavky pro aplikaci vysokorychlostního obrábění

Pro realizaci těchto teoretických předpokladů a zákonitostí musí existovat odpovídající možnosti přístupu do **CAD/CAM** – systémů. Při obrábění frézami s kulovou hlavou by mělo být usilováno o přistavení nástroje se sklonem cca 15^0 a o obrábění v tažném řezu, čímž se zabráni řezání v ose rotujícího nástroje, kde je řezná rychlost nulová. Další možnosti

zlepšování řezného procesu, přesnosti rozměrů a jakosti obrobeného povrchu jsou součástí probíhajícího intenzivního výzkumu. Mimo jiné se jedná o automatické přizpůsobení se posuvu výpočtem aktuálního obráběného průřezu, jakož i automatickou kompenzaci deformace pomocí vypočtené prognózy chyb obrysu.



Obr. 15 Požadavky na činnost související s procesem HSC

Také nástroje pro HSC – obrábění se podstatně odlišují od konvenčních fréz. Jsou koncipovány pro mnohem větší počty otáček, a proto musí být „absolutně symetrické“ podle osy otáčení s minimálními tolerancemi nevyváženosti a na obvodové házení. Geometrie břitů musí vyhovovat změně tvorbě třísek. Nástroj musí vykazovat vysokou tuhost, ale mít dostatečně velké komory pro třísky, zvláště při obrábění lehkých kovů. Drážky musí být ostřeny tak, aby nevznikaly vrubové účinky. K zabezpečení klidného chodu je důležité zajistit vhodné překrytí břitů, což lze například realizovat vysokým počtem břitů z nebo velkým úhlem sklonu šroubovice ω .

Základními vlastnostmi kvalitního řezného materiálu je dostatečná odolnost proti opotřebení, teplotní stabilita a značná houževnatost. Jeho povrch je chráněn vhodnou povrchovou úpravou, nejlépe povlakem naneseným metodou PVD (Physical Vapor Deposition). Jedná se zde o fyzikální vylučování z parní fáze nebo CVD Chemikal Vapor Deposition – chemickým vylučováním z parní fáze. Všechny podstatné požadavky lze shrnout do následujícího schématu:

Prostřednictvím optimálního sladění všech souvisejících činností v daném výrobním prostředí a čase lze dosáhnout výše uvedených efektů, které vysokorychlostní obrábění na základě teoretických zákonitostí přímo nabízí. S vysokou pravděpodobností lze předpokládat, že se optimálního řešení, a tím i maximální efektivity, při uvažování všech souvisejících činností, zpravidla nepodaří dosáhnout. Neznamená to však, že je nesprávné o stanovování optimálních řezných parametrů permanentně usilovat.



Kontrolní otázka

Na co se klade důraz v současném strojírenství?

Jak lze efektivně zvýšit produktivitu výroby a snížit výrobní náklady?

K jakému procesu dochází ve smykové rovině při klasickém obrábění?

Jak lze dosáhnout potřebné teploty v případě nepřerušovaného obrábění keramických a jiných supertvrdých materiálů?

Čím je určena oblast přípustných řešení?

Jaké existují limitující faktory výroby?



Úkol k řešení

1. Vypište a charakterizujte vybrané metody, které směřují ke snižování výrobních nákladů.
2. Zpracujte program pro hospodaření s nástroji a nářadím, prostřednictvím něhož podstatně snížíte dobu zpracování údajů, které jsou nezbytné pro „plné využití daného výrobního systému“.
3. Stanovte program pro sledování životnosti nástrojů a spotřebu nářadí, který bude směřovat k významnému snížení výrobních nákladů.
4. Uveďte v písemné či elektronické formě příklad, jak lze dosáhnout využitím NC strojů vyšší efektivity výroby.
5. Sestavte princip a smysl zavádění a využívání systému, který umožní optimální nasazení výrobního nářadí.
6. Navrhnete jiný systém hospodaření s nářadím, který v daném technologickém prostředí povede k ekonomickým úsporám.
7. Nakreslete a popište primární plastickou oblast pro klasické a HSC obrábění a zdůvodněte základní rozdíly a jejich příčiny.
8. Schematicky znázorněte oblast sekundární plastické deformace a vysvětlete důvody jejího vzniku. Charakterizujte rozdíly sekundárních oblastí u klasického a HSC obrábění.
9. Vypočtete efektivní průměr d_{eff} nenakloněné kulové frézy průměru 8 mm, při tloušťce obráběné vrstvy 0,18 mm a otáčkách vřetene $n = 4\,000\text{ min}^{-1}$.
10. Jaký bude efektivní průměr d_{eff} dvoubřité stopkové frézy s kulatým čelem o průměru $d = 8\text{ mm}$, frézujeme-li tloušťkou obráběné vrstvy (hloubkou řezu) $a_p = 0,25\text{ mm}$?
13. Vypočtete objemový úběr frézovacího centra při $a_p = a_e = 5\text{ mm}$ a $v_f = 15\,000\text{ mm.min}^{-1}$.
14. Zpracujte tabulku matice odpovědnosti a spolupráce.

2. MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

Budete umět:

- Popsat požadavky na řezné materiály
- Detailněji popsat a rozdělit jednotlivé materiály řezných nástrojů

Budete umět

Budete schopni:

- Popsat výrobu, způsoby povlakování nebo správné technologické použití

Budete schopni

2.1. Vlastnosti řezných materiálů



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat požadavky kladené na řezné materiály
- popsat rozdělení řezných materiálů dle ISO

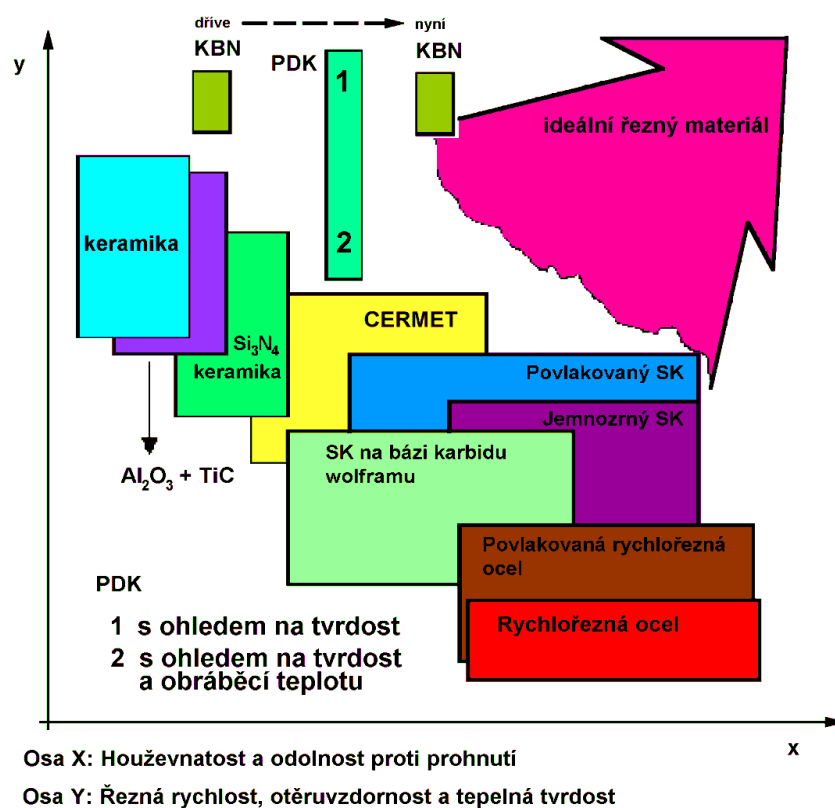
Řezné materiály (materiál řezného klínu a potažmo břitu) rozhodujícím způsobem ovlivňují produktivitu, výrobní náklady a kvalitu výroby. Jejich význam je charakterizován náročnými požadavky, ve kterých břit nástroje pracuje. Při obrábění bývají vystaveny intenzivnímu mechanickému a tepelnému namáhání. To vede k otupování břitu, případně i k celkové destrukci. Řezný materiál musí mít proto větší tvrdost než materiál obráběný, aby mohl řezný klín vniknout do obráběného materiálu a odřezávat třísku.

Požadavky kladené na řezné materiály

- pevnost v tlaku,
- tvrdost v tlaku,
- houževnatost a pevnost v ohybu,
- pevnost za tepla a odolnost proti teplotním rázům,
- odolnost proti otěru (adheze, difuze, nárůstky...),
- chemická stálost a chemicky neutrální chování vůči obráběným materiálům,
- odolnost proti vzniku trhlin a pevnost vazby vnitřních fází,
- vysoká řezivost.

Pro nástroje s definovanou geometrií břitu se zpravidla používá následující rozdělení materiálů obráběcích nástrojů:

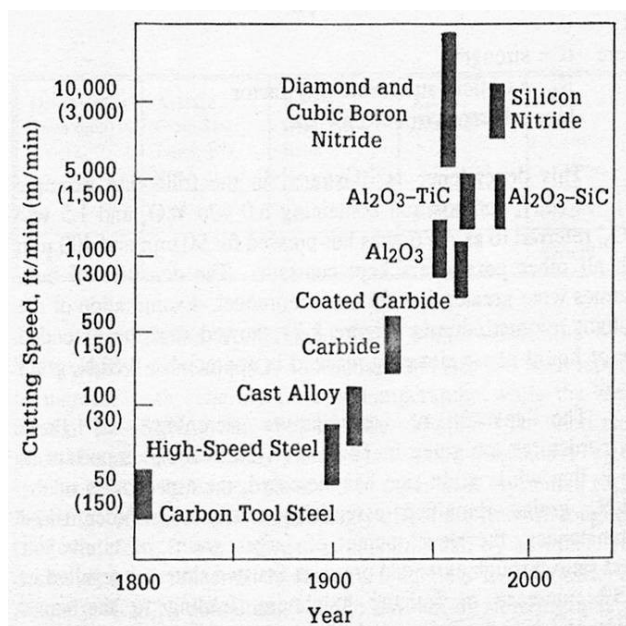
- kovové nástroje (vyrobené klasickým tavením),
- nástrojové oceli (NO),
- spékané tvrdokovy (vyrobené práškovou metalurgií),
- slinuté karbidy (SK),
- cermety,
- keramické materiály (nekovové lisované prášky),
- řezná keramika (ŘK),
- syntetické velmi tvrdé materiály,
- kubický nitrid boru (KBN),
- diamant (PKD).



Obr. 16 Oblasti aplikace nejpoužívanějších materiálů řezných nástrojů



Obr. 17 Přehled výkonných řezných materiálů



Cutting speed – řezná rychlost

Year – rok

Carbon Tool Steel – uhlíková oceli

High-speed steel – rychlořezná ocel

Cast Alloy – slitinová ocel

Carbide – slinutý karbid

Coated Carbide – povlakovaný SK

Silicon Nitrid – Si₃N₄

Diamond – diamant

Cubic Boron Nitride – KBN

Obr. 18 Změna produktivity řezných materiálů v čase

Rozdělení řezných materiálů dle ISO

Podle normy ISO 513 : 2002 se obráběcí materiály dělí do 6 hlavních aplikačních skupin a každá se dále dělí na aplikační skupiny. Hlavní aplikační skupiny se dělí podle materiálů, kterými se obrábí. Identifikačními znaky jsou písmena a barva. Každá aplikační skupina je určena písmenem hlavní skupiny a klasifikačním číslem. Výrobci řezných materiálů bylo uspořádáno pořadí v aplikačních skupinách podle relativního opotřebení a pevnosti. Čím je číslo nižší, tím je možné obrábět vyšší rychlostí a má vyšší otěruvzdornost. A naopak čím je číslo vyšší, tím rostou rychlosti posuvu a pevnost řezných materiálů.

Rozdělení aplikačních skupin dle ISO 513 : 2002:

- P (modrá barva značení) WC + TiC + Co
- M (žlutá barva značení) WC + TiC + TaC. NbC + Co
- K (červená barva značení) WC + Co
- N (zelená barva značení)
- S (hnědá barva značení)
- H (šedá barva označení)

Skupina P – je určena pro obrábění materiálů tvořící dlouhou třísku, jako uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické nerezavějící oceli. Řezný proces je doprovázen velkými řeznými silami a značným opotřebením na čele nástroje. Přísada TiC zaručuje vysokou odolnost proti difuzi za vysokých teplot a je jednou z hlavních příčin výmolů na čele nástroje.

Skupina M – má universální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří střední a delší třísku jako jsou lité oceli, nerezavějící austenitické a austeniticko – feritické oceli [18] a tvárné litiny. Pro svoji relativně vysokou houževnatost se SK této skupiny používají pro těžké hrubovací práce a pro přerušované řezy. Síly řezání dosahují středních až vysokých hodnot a dochází k vydrolování ostří.

Skupina K – je určena pro obrábění materiálů, které vytváří krátkou drobivou třísku, zejména litiny, temperovaná litina a litina s globulárním grafitem. Síly řezání jsou obvykle relativně nízké a převládá abrazivní a adhezní opotřebení. SK této skupiny nejsou vhodné pro materiály tvořící dlouhou třísku, která zatěžuje tepelně čelo nástroje.

Skupina N – je určena k obrábění materiálů z neželezných kovů, zejména hliníku a dalších neželezných kovů, jejich slitin a nekovových materiálů.

Skupina S – používá se na obrábění tepelně odolných slitin na bázi železa, niklu a kobaltu, titanu a titanových těžce obrobitelných slitin.

Skupina H – je vhodná na obrábění kalených a vysoce tvrdých ocelí, tvrzených a kalených litin. Dalším velmi důležitým kritériem odolnosti materiálu vůči opotřebení je jeho tepelná odolnost.

Nástrojové oceli

Tento druh řezného materiálu můžeme zařadit mezi ušlechtilé oceli. Zhotovují se z nich především nástroje na obrábění, řezání, stříhání, tváření za tepla i za studena, měřidla apod.

Podle chemického složení je lze dále dělit na:

- uhlíkové oceli,
- slitinové oceli,
- rychlořezné oceli.

Uhlíkové nástrojové oceli

Tyto oceli obsahují asi 1,25% C a menší množství Mn. Tvrdost a odolnost proti otupení (otěru) zajišťuje jejich martenzitická struktura. Se stoupajícím obsahem uhlíku roste tvrdost a tím i odolnost proti otupení, ale současně klesá jejich houževnatost. Tyto oceli jsou citlivé na tepelné zpracování a na druh použití, zejména při vyšších teplotách, kdy nástroje z uhlíkových ocelí ztrácí tvrdost. Jejich maximální teplotní odolnost je okolo 250°C.

Vyrábí se z nich málo namáhané nástroje jako např. ruční nástroje a nářadí (pilníky, škrabáky, nože, sekáče, sekery, kladiva...), nože strojních nůžek a kamenické nářadí.

Slitinové oceli

Oceli slitinové obsahují méně než 1,25% uhlíku a jsou legovány především manganem, chromem, molybdenem, niklem a wolframem. Jsou více odolné proti otupení a mají vyšší tvrdost a pevnost za tepla. Vyznačují se dobrou prokalitelností, která je vhodná zejména pro tvarově náročné nástroje.

Vyrábí se z nich nástroje s vyšším namáháním. Nejsou však vhodné pro výkonné řezání a obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Hlavními oblastmi použití jsou tvářecí nástroje, zápustky, formy na plasty a jednoduché řezné nástroje (výhrubníky, výstružníky, protahováky, závitníky, pilové listy, dřevoobráběcí nástroje...). Odolávají teplotám do 350°C.

Rychlořezné oceli

Jsou vysokolegovány legujícími prvky, mezi které patří zejména wolfram, jehož obsah může činit až 18%. V porovnání s ostatními nástrojovými oceli mají několikanásobně vyšší řezivost a dobrou pevnost v ohybu. Mají též vysokou tvrdost a odolnost proti popouštění a snášení maximální teploty okolo 550 °C.

Vyrábějí se z nich především namáhané nástroje pro obrábění (soustružnické a hoblovací nože, frézy, pilové kotouče, závitové čelisti a závitníky, tvarové nože...) a nástroje na opracovávání dřeva. Mohou se používat i při obrábění s rázy nebo při přerušovaném řezu.

Rychlořezné oceli vyrobené práškovou metalurgií

V budoucnu se budou prosazovat rychlořezné oceli vyrobené práškovou metalurgií. Tato metoda umožňuje vytvářet velmi homogenní strukturu a vývoj nestandardních chemických variant.

K jejich výhodám patří:

- homogenní struktura,
- dobré technické vlastnosti – tvařitelnost, brousitelnost, leštitelnost,
- tvarová a rozměrová stálost při slinování,
- zlepšená houževnatost,
- materiálová a ekonomická náročnost.

Povlakované rychlořezné oceli

Kromě snah o zlepšení vlastností základního materiálu, kvality tepelného zpracování a ostření mají mimořádný význam především metody úprav povrchových vrstev funkčních částí řezného nástroje. Jejich cílem je nejen zvýšení životnosti nástroje, ale i jeho výkonnosti. Pro rychlořezné oceli se používá metoda povlakování PVD, která je založena na rozprašování nebo odpařování pevného terče (Ti, Cr, Al), na bombardování podložky (nástroje) směsí neutrálních atomů a iontů a kondenzaci chemické sloučeniny, např. nitridu, karbidu nebo oxidu zvoleného kovu na nástroje ve vakuové komoře.

Používají se tři základní typy povlakování metodou PVD. Jedná se o napařování, naprašování a iontové plátování. Dosud nejčastěji je aplikován povlak TiN (asi 75% povlakovaných nástrojů), další v pořadí četnosti jsou (Ti, Al)N a Ti (C, N). Mezi výhody lze zařadit možnost povlakování ostrých hran, k nevýhodám všech metod PVD patří relativně složitý vakuový systém. Vzhledem k tomu, že rychlořezné oceli patří mezi nejvíce legované nástrojové oceli a jsou tedy nejnáročnější na deficitní legující prvky, optimální využívání rychlořezných ocelí má značný ekonomický význam.

Slinuté karbidy

Jsou vyráběny práškovou metalurgií, kde je struktura tvořena karbidy vysocetavitelných kovů wolframu (WC), titanu (TiC) a pojícím kovem, kterým je nejčastěji kobalt (Co). Jako další přísady se používají karbidy tantalu (TaC) a niobu (NbC). Velký rozvoj zaznamenaly slinuté karbidy zejména na konci 50. let minulého století při změně v upevnění VBD z pájené na konstrukci s mechanickým upínáním.

V současné době většina výrobců slinuté karbidy povlakuje. Povlakované slinuté karbidy jsou složeny z pevného karbidového podkladu a termochemicky stabilního povlaku (karbidy, nitridy, oxidy a jejich kombinace). Výsledkem jsou lepší materiály pro vysoké řezné a posuvové rychlosti, vysoký úběr třísky a přerušovaný řez. Hlavním cílem povlaků je snížit součinitel tření, neulpívání třísek na čele, získání tvrdého povrchu při zachování houževnatého jádra, zamezení vzniku nárůstků a zejména prodloužení životnosti nástroje. Získáme tak vysoce kvalitní nástroje, zajišťující vysoký úběr materiálu, vysoké řezné a posuvové rychlosti i možnost využití pro přerušované řezy. Jako první se na trhu objevily povlaky z TiC a brzy na to byly vyvinuty povlaky typu TiN a TiCN, povlaky Al_2O_3 přišly na trh nejpozději. Mají vyšší teplotní odolnost oproti předchozí skupině materiálů a to přibližně 800°C .

Nejčastěji se uvádějí tyto vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů:

1. generace: jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou asi $7\mu\text{m}$ a špatnou soudržností podkladu a povlaku.
2. generace: jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN) bez eta-karbidu na přechodu podklad - povlak. Zdokonalení technologie výroby umožnilo vytvořit vrstvy povlaků o větší tloušťce (až $13\mu\text{m}$), bez nebezpečí jejich odlupování při funkci nástroje.
3. generace: vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které mají relativně nižší odolnost proti opotřebení a jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu, ale požaduje se od nich zejména vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení. Nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v tomto pořadí (od podkladu k povrchu): TiC- Al_2O_3 , TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC- Al_2O_3 -TiN.
4. generace: speciální vícevrstvý povlak (velmi často i více než 10 vrstev a mezivrstev), s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami (užívají se stejné materiály povlaků jako u 3. generace).
5. generace: Vůbec nejnovější povlaky firem mají mezi podkladem a vlastním povlakem vrstvu speciálního materiálu typu WC-Co. Je tedy zřejmé, že se aplikují jak jednovrstvé, tak i vícevrstvé povlaky, a to podle různých způsobů a podmínek

obrábění. Různé druhy povlaků vykazují různé vlastnosti, např. TiC je nejtvrdší a má největší odolnost vůči abrazivnímu opotřebení, naproti tomu TiN je měkčí a proto méně otěruvzdorný, ale termodynamicky stabilní a odolný proti tvorbě výmolů na čele nástroje. Al_2O_3 vykazuje největší otěruvzdornost při vysokých teplotách, tedy při vysokých řezných rychlostech. Proto má vícevrstvá technologie velký význam pro optimální kombinaci požadovaných vlastností povlakovaných destiček. Aplikace vícevrstevných povlaků má rostoucí tendenci a řazení vrstev je obvykle v posloupnosti substrát (podklad) - TiC - TiCN - TiN - Al_2O_3 .

Metody povlakování SK

Povlakované slinuté karbidy jsou vyráběny tak, že na podklad z běžného slinutého karbidu typu (v současné době jsou již povlaky většinou nanášeny na podkladové SK, vyrobené speciálně k tomuto účelu) se nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení (povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost, než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě). Tyto výhodné vlastnosti vyplývají zejména z toho, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů a tvoří bariéru proti difúznímu mechanismu opotřebení nástroje. Podle principu se metody povlakování dělí do dvou základních skupin:

Metoda PVD

Metoda PVD = fyzikální napařování, která je charakteristická nízkými pracovními teplotami. Tato metoda se používá zejména pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí (nízká teplota zaručuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění nástroje), pro povlakování slinutých karbidů se dosud využívala méně často (v posledním období ale dochází k poměrně významnému rozvoji metod PVD a rozšiřování jejich aplikací také v oblasti SK). Povlak je vytvářen napařováním, naprašováním nebo iontovým plátováním. Fyzikální proces povlakování probíhá ve středním až vysokém vakuu. Při napařování je čistý kov (obvykle Ti) odpařován pomocí elektrického oblouku.

K nevýhodám všech výše uvedených metod PVD patří relativně složitý vakuový systém a požadavek pohybovat povlakovanými předměty, aby bylo zaručeno rovnoměrné ukládání povlaku po celém jejich povrchu (tento požadavek souvisí s tzv. stínovým efektem, který u dané metody způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částic,

se vytváří nedokonalá vrstva povlaku, případně se povlak vůbec netvoří). Mezi výhody lze zařadit možnost povlakování ostrých hran (tedy i tzv. ostře provedeného ostří nástroje, *s poloměrem zaoblení břítu pod 20 μm*).

Metoda CVD

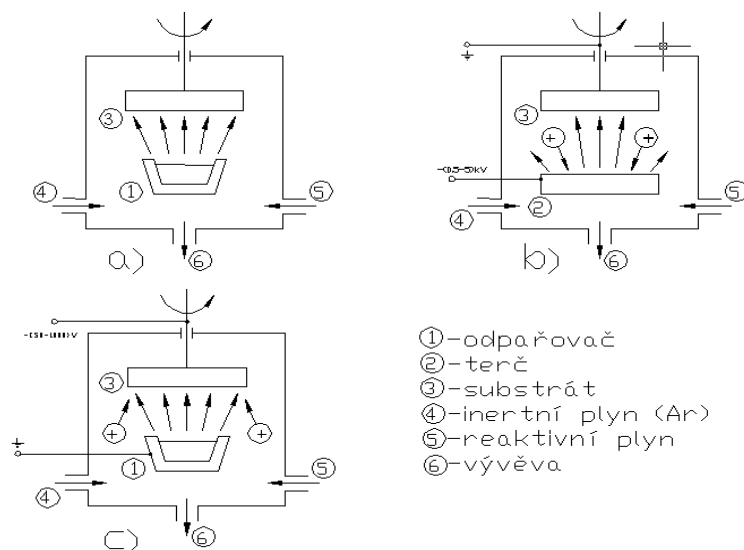
Metoda CVD = chemické napařování z plynné fáze, která probíhá za vysokých teplot; tato metoda je hlavní metodou povlakování slinutých karbidů a může být realizována ve třech variantách:

- tepelně indukovaná,
- plazmaticky aktivovaná,
- fotonově indukovaná (např. laserem).

Chemický proces povlakování je založen na reakci plynných chemických sloučenin v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového slinutého karbidu a následném uložení produktů reakce na tomto povrchu. Poměrně velkým procentem je v přiváděných plynech zastoupen nosný plyn (např. Ar, H₂), který dopravuje danou směs plynů k povlakovanému předmětu, umožňuje řízení celého procesu a výrazně ovlivňuje rychlost růstu vrstvy povlaku.

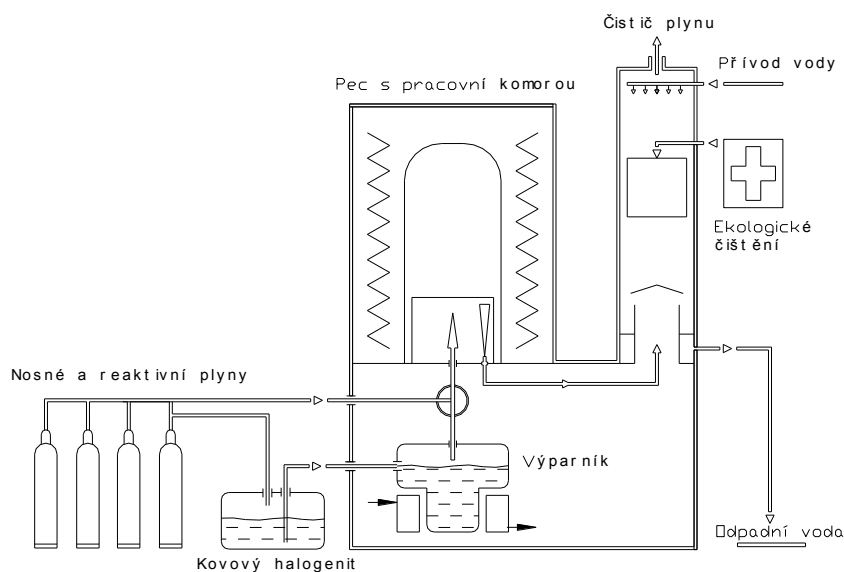
Mezi hlavní výhody povlakování metodou CVD patří:

- vysoká hustota povlaku,
- vynikající adheze k podkladovému materiálu,
- dobrá stechiometrie povlaku,
- povlakování předmětu ze všech stran jako důsledek poměrně vysokých pracovních tlaků plynné směsi (1-100 kPa).



(a-napařování, b-naprašování, c-iontové plátování)

Obr. 19 Povlakování metodou PVD



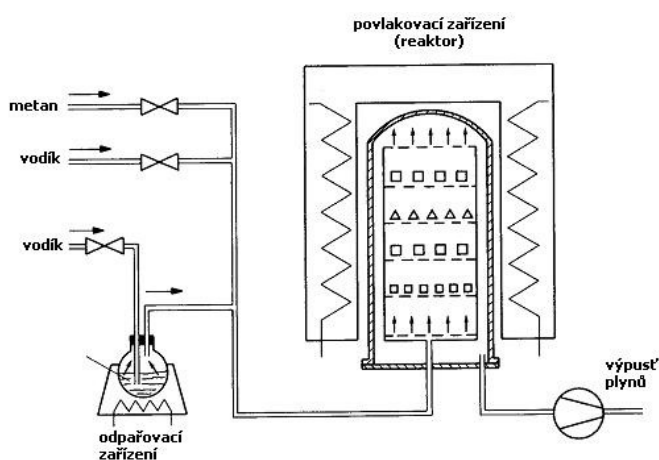
Obr. 20 Povlakování metodou CVD

Nevýhodou metody CVD jsou vysoké pracovní teploty, které mohou mít nepříznivý vliv na vlastnosti povlakovaného předmětu po absolvování procesu (netýká se slinutých karbidů). Tím je omezen rozsah podkladových materiálů, a proto je současný vývoj dané metody zaměřen zejména na snížení pracovní teploty.

Metoda MTCVD

Na rozdíl od konvenční CVD technologie, při které je teplota nanášení povlaku 1000 - 1040°C, MTCVD technologie umožňuje použít teploty podstatně nižší (700 - 850°C). Zatímco u konvenční CVD technologie slouží jako zdroj uhlíku a dusíku plyný metan CH_4 a plyný dusík N_2 , MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril CH_3CN , též metylkyanid. Jedná se o vysoce toxickou a hořlavou kapalinu. Jako zdroj titanu používají obě technologie chlorid titaničitý TiCl_4 .

Hlavní výhodou MTCVD technologie je to, že v důsledku nižší reakční teploty dochází ke značnému nárůstu houževnatosti, případně jejímu zachování. Mikrotvrdost běžně připravených karbonitridů má klesající tendenci ve směru od substrátu k povrchu vzorku. Je to logický důsledek faktu, že ve směru narůstání povlaku roste i jeho zrnitost, která je příčinou poklesu mikrotvrdosti. Zrnitost MT-TiCN vrstvy je nejmenší právě v místech, kde MT-TiCN vrstva začíná růst. Mikrotvrdost MT-TiCN vrstvy může obecně kolísat od 1600 do 3000 $\text{HV}_{0,05}$ v závislosti na zrnitosti a na reakčních podmínkách nanášení povlaku (tlak, teplota, koncentrace jednotlivých chemických látek) [25].



Obr. 21 Povlakování metodou MTCVD

Řezná keramika

Název keramika byl tradičně spojován s produkty, které byly „vypalovány“ z tvarovaného přírodního materiálu. Při tvarování tohoto typu keramiky tvořili částice silikátů základní fázi uloženou ve fluidním prostředí. Velká část průmyslu, která produkuje tyto poměrně laciné produkty, bude v tomto využití keramiky pokračovat. Postupem času však vzrostly požadavky na použití keramiky v prostředí s podstatně vyššími nároky. Od osmdesátých let dochází

k rozvoji tzv. konstrukční keramiky založené na rozvoji takových mikrostrukturních charakteristik, které umožní dosažení speciálních mechanických a tepelně mechanických vlastností. Požadavky na nízkou měrnou hmotnost a tepelnou vodivost, odolnost proti tepelným rázům při zachování potřebné pevnosti a tvrdosti se musely řešit vhodnou kombinací použitých materiálů a makrostruktury.

Moderní definicí je keramika obecně považována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavními složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Tato definice zahrnuje nejen tradiční keramiku (porcelán, cihly, cement), ale i broušící materiály a řadu nových (speciálních, konstrukčních, strojírenských, průmyslových nebo jinak nazývaných keramických látek jako jsou oxidická keramika (Al_2O_3 , ZrO_2 , BeO ...), ferity, feroelektrika, nitridy (na bázi Si, B, Al), karbidy (na bázi Si, B) a další. Pro současnou keramiku je charakteristické, že je vyráběna z poměrně čistých surovin a často z čistých výchozích chemikálií jako keramika syntetická. Jsou to látky označované jako keramika krystalická, na rozdíl od tradiční keramiky, která obsahuje i velký podíl skelné (amorfní) fáze. Keramické látky jsou vázány meziatomovými vazbami iontovými a kovalentními. Jejich vazba však není čistě iontová nebo čistě kovalentní. Zpravidla se vyskytují obě vazby zároveň. V krystalové struktuře převažují složité mřížky kubické a hexagonální.

V široce rozvětveném používání obecné keramiky zaujímá oblast technické nebo řezné keramiky zatím relativně malý podíl. Pro její vynikající vlastnosti se jí však otvírají stále nové oblasti použití. Je důležité zdůraznit, že o keramice tak jak ji známe z denního použití (porcelán, kamenina) máme určitou představu. Známé vlastnosti jako křehkost, náchylnost k rozbití, apod. se pak přenáší i na technickou keramiku. Mluvíme-li však o řezné keramice, jedná se o technologicky vyspělé výrobky, které jsou určeny pro extrémní podmínky, kde se požaduje např. vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká tepelná stálost, vysoká tvrdost, atd.

Technické použití keramických materiálů

Intenzivní výzkumnou činností byly výrazně zlepšeny některé vlastnosti keramických materiálů. To umožnilo podstatné rozšíření jejich aplikací ve strojírenské výrobě. Charakteristické vlastnosti umožňují používat keramické materiály v těchto oblastech technické praxe:

- tepelné aplikace – odolnost vůči vysokým teplotám, stabilita tvaru při tahu a tlaku i za vysokých teplot, odolnost proti náhlým změnám teploty, nízká tepelná roztažnost, schopnost akumulace tepla, dobrá tepelná vodivost,
- mechanické aplikace – vysoká tvrdost, vysoká odolnost proti opotřebení dobré a stabilní kluzné vlastnosti, nepřítomnost statického náboje, nízká měrná hmotnost, vysoká přesnost tvaru, úzké rozměrové tolerance,
- elektrotechnika, elektronika – výborné izolační vlastnosti, vysoká dielektrická pevnost, velká stabilita výboje, vysoký výkon zhášení výboje, definovaná dielektrická konstanta, dobré vysokofrekvenční vlastnosti, dobré mechanické vlastnosti,
- fyzikální a chemické aplikace – chemická odolnost vůči kyselinám a louhům, chemická inertnost, odolnost vůči korozi a erozi, akumulární a pohlcovací schopnost, velký geometrický a měrný povrch, filtrační schopnosti,
- medicína – biologická slučitelnost, chemická inertnost a stabilita, filtrační schopnost,
- stavebnictví – odolnost vůči horku a mrazu, příjemnost na dotyk, hygienické vlastnosti, mechanická stabilita, plynotěsnost, chemická inertnost.

Jednotlivé vlastnosti keramik lze různě kombinovat a měnit podle konkrétního použití na jednotlivé aplikace. Proto se vybrané keramické materiály úspěšně používají pro výrobu řezných nástrojů pro třískové obrábění.

Jsou zde s výhodou využívány tyto vlastnosti řezné keramiky:

- vysoká tvrdost,
- odolnost proti mechanickému namáhání,
- odolnost proti působení vysokých,
- odolnost proti opotřebení,
- vysoká trvanlivost a řezivost,
- odolnost proti korozi a chemickým vlivům,
- nízká měrná hmotnost,
- dostupnost základních surovin,
- ekologická nezávadnost,
- příznivá cena.

Historický vývoj

Pravděpodobně vůbec první keramický nástroj byl použit již v době kamenné, kdy člověk používal pískovcové bloky obsahující velké množství SiO_2 k ostření nožů a dalších nástrojů. Tyto pískovcové kotouče se staly po dlouhou dobu brousicím nástrojem číslo jedna.

Počáteční pokusy s využitím keramických řezných nástrojů sahají do 20. let minulého století (keramika na bázi oxidů). První keramický materiál na bázi Al_2O_3 použitelný pro řezný nástroj vyvinula německá firma Degussa v období II. světové války jako pokus o náhradu slinutých karbidů WC-Co. Vzhledem k vysoké křehkosti byly aplikace omezeny na nepřerušovaný řez a k širšímu rozšíření nedošlo, protože technologie výroby nebyla zdaleka propracována tak, aby bylo možno zhotovit nástroj požadovaných vlastností.

První keramické materiály na bázi oxidu hlinitého byly úspěšně aplikovány až koncem 50. let na základě intenzivního výzkumu. Ten byl zaměřen na odstranění hlavních nedostatků (hrubozrnná struktura, nízká ohybová pevnost, nízká odolnost proti teplotním rázům). Masivnějšímu rozšíření bránil i nedostatek dostatečně výkonných strojů s potřebným výkonem a rozsahem otáček vřetene, a to bez ohledu na přesnost. První nástroje obsahovaly většinu oxidu hlinitého (Al_2O_3) a malé množství slinovacích přísad (obvykle okolo 1%). Oxid

hlinitý má z nástrojových materiálů nejlepší termochemickou stabilitu a vysokou odolnost proti opotřebení, ovšem nízkou odolnost proti vydrolování ostří.

Na začátku 70. let byly vyvinuty keramiky typu $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, které měly zlepšit odolnost proti vydrolování a spolehlivost keramických řezných nástrojů. Jedná se o dnes nejrozšířenější typ řezné keramiky, která se zasloužila o vstup keramických VBD na trh obráběcích nástrojů. Slinovací proces se postupně změnil z vysokoteplotního lisování na vysokoteplotní izostatické lisování (HIP), a to za účelem snížení ceny nástroje a zvýšení produktivity výroby.

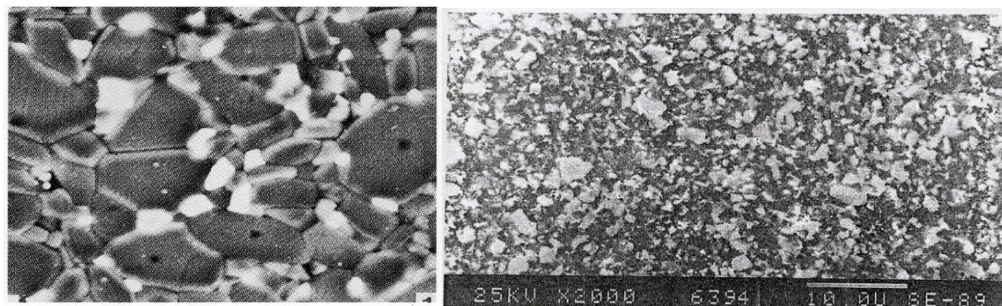
V polovině 80. let byly vyvinuty kompozity Al_2O_3 vyztužené vlákny whiskery (SiC). Karbid křemíku má sice tendenci reagovat se slitinami železa, což zapříčiňuje větší opotřebení nástroje, ovšem přidáním jeho vláken se výrazně zvýší odolnost proti vydrolování a vylamování ostří v důsledku zpevnění a odolnosti proti oxidaci. Výsledkem jsou vynikající řezné výkony těchto materiálů při obrábění superslitin, kde hrozí nebezpečí vylamování ostří. Počátkem 80. let se na trh dostávají i první keramické nástroje na bázi Si_3N_4 . Ve srovnání s oxidickými keramikami se dají používat až při dvojnásobné posuvové rychlosti. Nevýhodou je poměrně rychlé opotřebování, zejména při obrábění ocelí a tvárné litiny.

Rozdělení a značení ŘK

Pro dělení a značení keramických řezných materiálů neexistuje konkrétní norma, jako je tomu např. u slinutých karbidů či nástrojových ocelí. Každý autor si uvádí své rozdělení ŘK. Všeobecně se však přijímá následující dělení:

- na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3),
- čistá (oxidická) - 99,5% Al_2O_3 ,
- směsná - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$
- vyztužená - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$...,
- na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4) - $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiC}$, sialony.

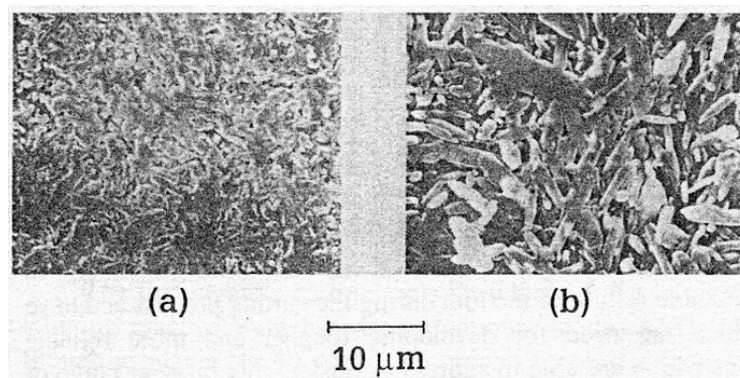
Jednotliví výrobci keramických nástrojů dodávají nástroje v celém rozsahu sortimentu. Obchodní značení konkrétních výrobců odpovídá zvyklostem jednotlivých výrobců. Zlepšení fyzikálních a mechanických vlastností umožnilo rozšířit oblast použití z původního soustružení na obrábění téměř všech materiálů na bázi železa a to i při hrubování a přerušovaném řezu.



a) čistý Al_2O_3

b) $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{TiC}$

Obr. 22 Struktura oxidické keramiky Al_2O_3



a) lisováno 90 minut

b) lisováno 400 minut

Obr. 23 Struktura nitridické keramiky Si_3N_4

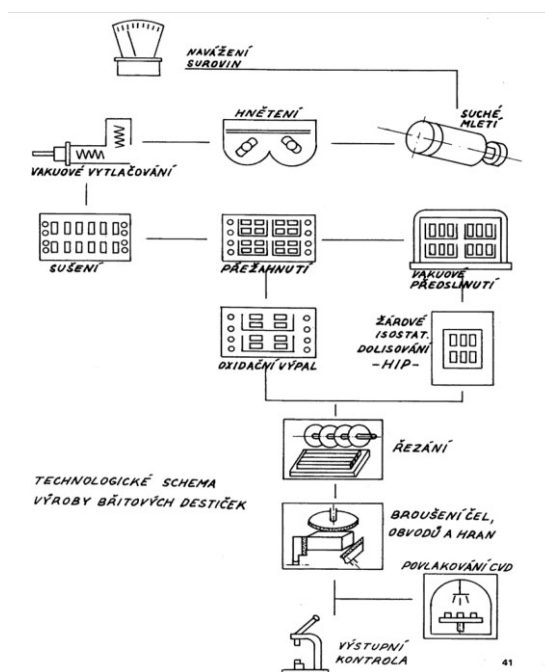
Výroba řezné keramiky

Proces výroby kompaktních keramických součástí (a tedy i vyměnitelných břitových destiček pro řezné nástroje) je velmi podobný procesu výroby součástí ze slinutých karbidů a cermetů. Zásadní rozdíl je ale v tom, že keramické materiály neobsahují žádný materiál, jehož funkcí by bylo spojení jednotlivých zrn tvrdé fáze do jednolitého tělesa. Tato skutečnost výrobu řezné keramiky znesnadňuje a klade vysoké nároky na výrobní zařízení. Další důležitou podmínkou úspěšné výroby je dodržení všech předepsaných parametrů technologického postupu výroby.

Vývoj mikrostruktury a slinovatelnost keramických materiálů je možno ovlivnit přidáním přísad. Tyto přísady v průběhu slinování vytváření kapalnou fází. Tímto způsobem lze dosáhnout hustějšího uspořádání částic a rychlejšího i lepšího zhutnění výrobku. Velikost zrn jednotlivých keramických prášků a aditiv se pohybuje kolem 200 nm.

Obecný postup výroby keramických materiálů:

- příprava práškové směsi,
- mletí,
- míchání,
- tvarování,
- sušení,
- předslinování,
- slinování,
- úpravy povrchu.



Obr. 24 Technologické schéma výroby VBD z řezné keramiky

Povlakování řezné keramiky

Povlakování řezné keramiky není tak obvyklé jako u slinutých karbidů. Používá se téměř výhradně metoda CVD (Chemical Vapour Deposition). V poslední době se začíná díky firmě CemeCon používat i metoda PVD (Physical Vapour Deposition). Hlavním posláním povlaku je zvýšení houževnatosti pomocí snížení šíření mikrotrhlinek základního materiálu nebo zvýšení otěruvzdornosti řezných hran. Nanáší se jedna vrstva karbidů nebo nitridů kovů (např. TiN, TiCN, apod.) popř. povlak Al_2O_3 na základní materiál Si_3N_4 .

Použití v oblasti obrábění

Řezná keramika patří mezi výkonné řezné materiály. Její nasazení ve strojírenské výrobě vyžaduje, mimo správné volby řezných podmínek, dodržení určitých zásad, aby mohlo být využito jejich výhodných vlastností v plné míře a nevýhodné co nejvíce potlačit. Mezi hlavní podmínky efektivního využití řezné keramiky patří:

- vysoká tuhost systému stroj – nástroj – obrobek (zamezení kmitání jakéhokoliv druhu, které zvyšuje intenzitu opotřebení nástroje),
- použití výkonných obráběcích strojů se širokým rozsahem posuvů a otáček s možností nastavení vysokých řezných rychlostí, plynulá regulace otáček,
- výborný stav obráběcího stroje,
- zabezpečení pevného a spolehlivého upnutí obrobku, zejména při vysokých otáčkách, kdy působí velké odstředivé síly,
- zakrytování pracovní části obráběcího stroje,
- výběr vhodného tvaru a velikosti břitové destičky,
- správná volba tvaru ostří břitové destičky (velikost a sklon negativní fazetky na čele),
- překonání nedůvěry k novému nástrojovému materiálu u technologa i pracovníka, který stroj obsluhuje.

Soustružení

Podobně jako u slinutých karbidů uvádějí jednotliví výrobci doporučené řezné podmínky i pro soustružnické práce svých keramických břitových destiček. U keramických materiálů hraje velmi důležitou roli i otázka chlazení. U většiny druhů keramických vyměnitelných břitových destiček je chlazení chladicí kapalinou výslovně zakázáno. Pro obrábění tvrdých materiálů (kalené oceli, tvrzené litiny) keramickými destičkami je nutné volit poměrně nízké hodnoty hloubky řezu apod.

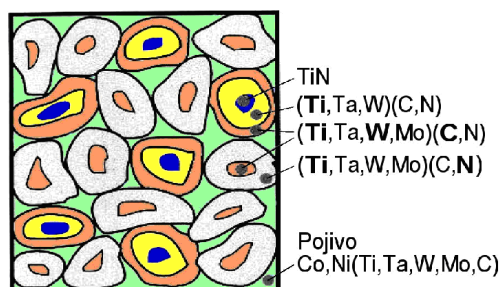
Frézování

V počátcích vývoje a výroby byly keramické řezné materiály doporučovány a používány výhradně pro obrábění nepřerušovaným řezem, tedy hlavně soustružení. Postupným vývojem a zlepšováním mechanických vlastností dnes většina výrobců řeznou keramiku doporučuje

i pro přerušované řezání. Jednou ze základních podmínek pro použití při přerušovaném řezu je vysoká stabilita systému STROJ – NÁSTROJ – OBROBEK a tedy zamezení vzniku vibrací. Toho se dá úspěšně dosáhnout použitím frézovacích hlav osazených vyšším počtem břitů.

Cermety

Název CERMET vznikl složením prvních tří hlásek slov „CERamics (keramika)“ a „METal (kov)“. Má tak vyjadřovat materiál, jehož mechanické vlastnosti vykazují výhodnou kombinaci tvrdosti keramiky a houževnatosti kovu. Jsou velmi rozšířené při dokončovací obrábění, protože tvrdá fáze cermetů vytváří při obrábění plochy s velmi nízkou drsností povrchu (v důsledku vynikající odolnosti proti adhezi a nízké náchylnosti k reakci s obráběným ocelovým materiálem). Cermety nové generace dosahují hodnot lomové houževnatosti a ohybové pevnosti srovnatelné se slinutými karbidy, které patří do stejné skupiny aplikace dle ISO.



Obr. 25 Struktura cermetů

Historický vývoj

Cermety nejsou žádným novým vynálezem, původně byly vyvinuty v rakouské firmě Plansee a byly navrženy tak, aby obešly patenty německé firmy Krupp. V té době byly tyto materiály velmi křehké. První generace použitelných cermetů byla vyvinuta v USA až v polovině 50. let. Tyto materiály však nevyvolaly velkou pozornost ani v USA ani v Evropě, a to zejména v důsledku své nedostatečné houževnatosti. Naproti tomu byly velmi uznávány v Japonsku jako levný a lehce dostupný materiál pro řezné nástroje, protože neobsahují W ani Co. Jejich vývoj byl realizován hlavně v Japonsku, kde našly větší uplatnění. Stimulem vývoje byl nedostatek wolframu v Japonsku a konkurence slinutých karbidů.

Vlastnosti cermetů

Charakteristickou vlastností cermetů je nízká měrná hmotnost, která se pohybuje v rozmezí $5,6-7,4 \text{ g cm}^{-3}$, což je přibližně polovina měrné hmotnosti slinutých karbidů. Jejich hlavní nevýhodou, podobně jako u keramiky je nízká houževnatost, která je sice neustále zvyšována, ale přesto nedosahuje hodnot obvyklých u slinutých karbidů. Jednou z cest, jak zlepšit mechanické vlastnosti slinutých karbidů, cermetů a řezné keramiky, je snižování velikosti zrna tvrdých strukturních složek. Materiály s jemným zrnem vykazují obecně vyšší tvrdost, lomovou houževnatost a pevnost v ohybu, což se výrazně projeví na zvýšení řezivosti i trvanlivosti břitových destiček, které jsou z nich vyrobeny⁸.

Vliv jednotlivých přísad na vlastnosti cermetů

Starší cermety obvykle obsahovaly směs kovů jako Ti, Ta, V, Nb, Mo, W, C, N, Ni a Co. Tyto materiály byly obvykle kombinovány, dokud nebylo dosaženo uspokojivých výsledků. Základní pojivem cermetů je nikl, ke kterému je často přidáván kobalt kvůli snížení rozpustnosti Ti v Ni a stabilizaci karbonitridů. Molybden je prvkem, který výrazně zpevňuje tuhý roztok niklu, a proto je do některých cermetů přidáván pro zvýšení pevnosti pojiva.



Obr. 26 Vlastnosti přísad na vlastnosti

Dnes se do pojiva namísto kobaltu přidává značné množství chromu a to pro zvýšení smáčivosti, houževnatosti, vysokoteplotní pevnosti a odolnosti proti oxidaci. Tím se dosáhlo vyšší bezpečnosti při obrábění, širší oblasti aplikace, lepší schopnosti udržovat jakost povrchu a přesnost. Dále byla umožněna schopnost vykonávat přerušované operace. Zlepšené vlastnosti byly dosaženy v důsledku zdokonalení rovnováhy mezi odporem k plastické

deformaci a houževnatosti. Byla zvýšena trvanlivost řezné hrany a zlepšil se odpor k tepelnému praskání.

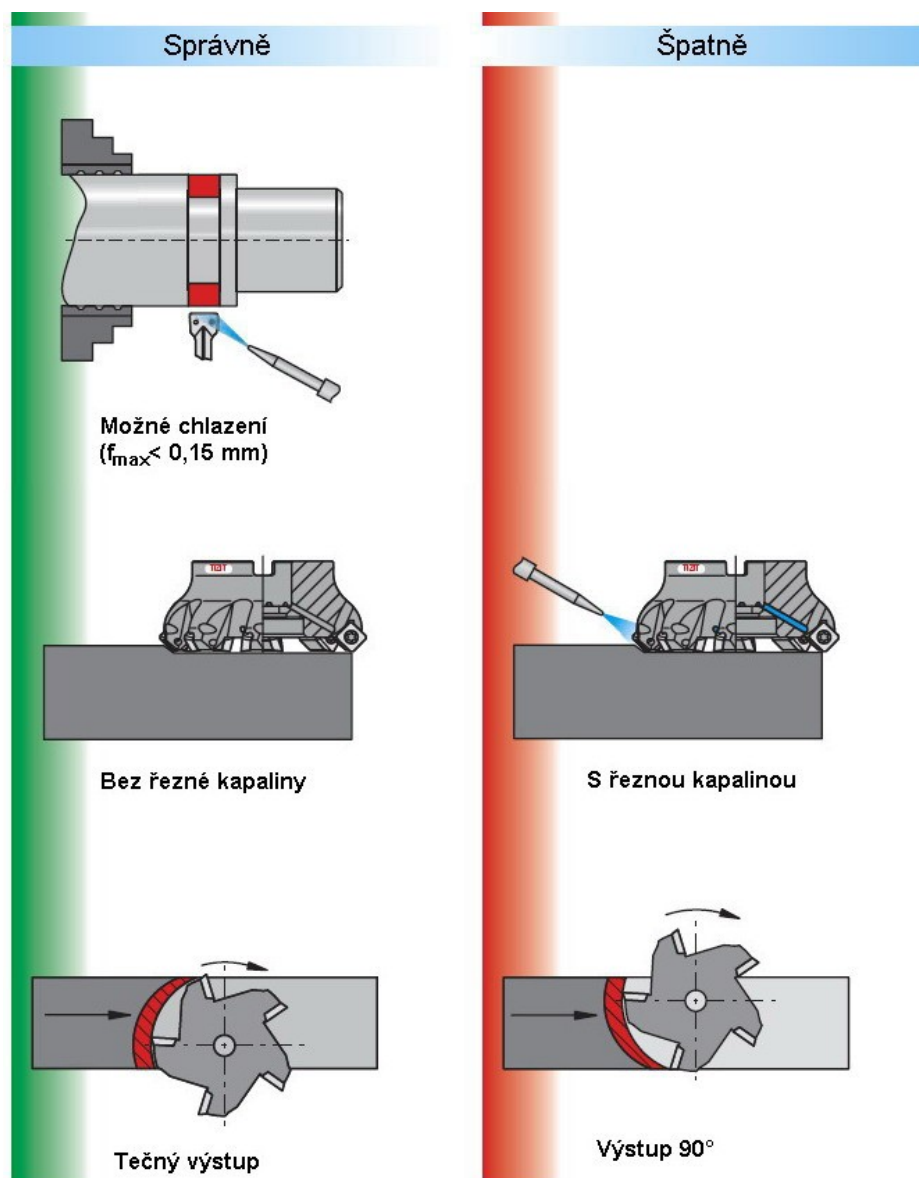
Povlakování cermetů

Cermety mohou být dále povlakovány kvůli prodloužení trvanlivosti břitů, nebo zvýšení řezné rychlosti. Pro povlakování se používají hlavně technologie CVD (Chemical Vapour Deposition) a technologie PVD (Physical Vapour Deposition). Tloušťka povlaku se u břitových destiček pohybuje od 2 do 15 μm . Nové generace VBD jsou opatřeny jednoduchými, dvojnásobnými, trojnásobnými a dokonce vícenásobnými vrstvami. PVD povlak je pro cermet nejvhodnější. Povlak nanášený metodou CVD často používaný u slinutých karbidů typu WC/Co se pro cermet nehodí. Způsobuje totiž často v cermetovém substrátu vznik vlasových trhlinek, které mohou být příčinou výlomů břitů¹.

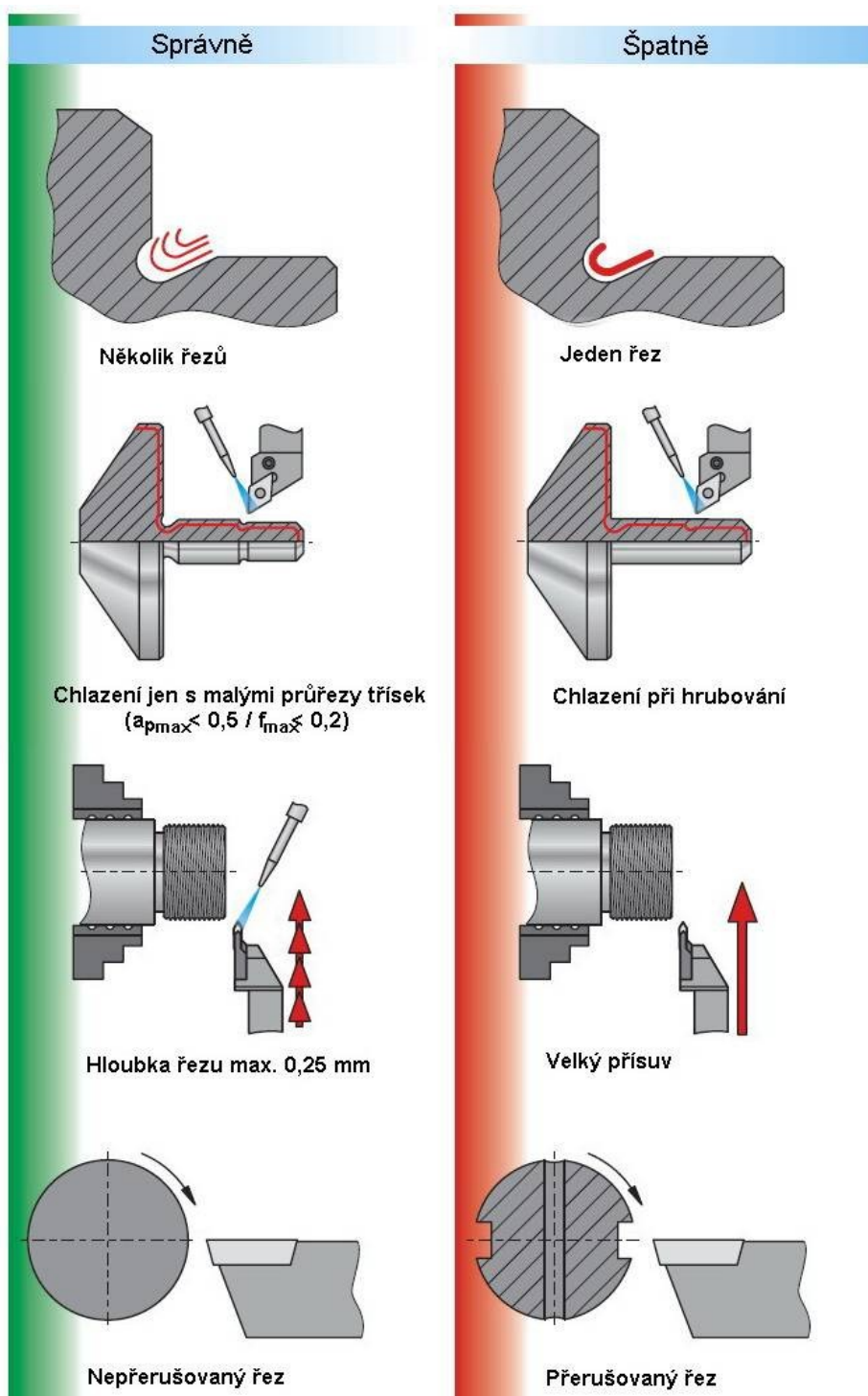
Zásady pro použití cermetů

Při používání vyměnitelných břitových destiček z cermetů je pro jejich optimální využití nutné dodržet několik obecných zásad:

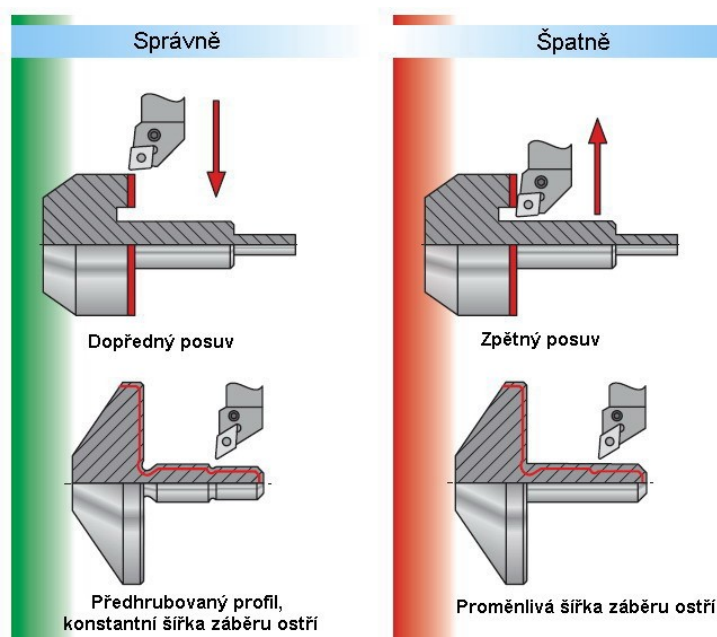
- při soustružení čelní plochy se volí posuv směrem od povrchu obrobku k jeho ose, tedy od maximální řezné rychlosti po minimální,
- při soustružení na čisto má být konstantní šířka záběru ostří po celou dobu soustružení a má zde být předhrubovaný profil podle tvaru součásti,
- zápichy soustružit na několik řezů,
- soustružit s použitím řezné kapaliny jen při malých průřezech třísky, šířka záběru ostří do 0,5 mm a posuv na otáčku do 0,2 mm,
- soustružení závitů na několik záběrů při hloubce řezu do 0,25 mm,
- soustružit jen při nepřerušovaných řezech,
- při zapichování možné chlazení pro posuv na otáčku do 0,15 mm,
- frézovat bez použití řezné kapaliny,
- frézovat sousledným způsobem, kdy se mění průřez třísky od maximální po minimální hodnotu.



Obr. 27 Doporučení pro úspěšné použití cermetů-část 1



Obr. 28 Doporučení pro úspěšné použití cermetů-část 2



Obr. 29 Doporučení pro úspěšné použití cermetů – část 3

Syntetické velmi tvrdé materiály

Jsou to technické materiály, které svými vlastnostmi (především tvrdostí a otěruvzorností) převyšují dosud známé běžné řezné materiály. Radíme zde polykrystalické materiály na bázi kubického nitridu boru (KBN) a na bázi diamantu (PKD). Pro vysokou cenu a u PKD někdy ochotnou reakci s obráběným materiálem se zatím příliš nerozšířily. Používají se vesměs pro velkosériovou výrobu a speciální metody obrábění.

Kubický nitrid boru

Měkkou hexagonální modifikací vystupuje nitrid boru v určité analogii s uhlíkem, kde krystalizuje se stejným typem mřížky jako grafit a tvrdou modifikací, která má identickou strukturu mřížky jako diamant. Přírodní CBN není vhodný pro nástroje s definovanou geometrií břitu, neboť na rozdíl od hexagonálního křemíku je měkký. Teprve transformací na kubickou mřížku za vysokých teplot a tlaků se stává kubický nitrid boru druhým nejtvrdějším materiálem po diamantu.

Nástroje osazené kubickým nitridem boru se používají při obrábění bílé litiny s tvrdostí nad 50 HRC, legované litiny a tvrdých návarů a stellitů. Při opracování těchto materiálů dosáhneme mnohem vyšší životnosti nástroje než při obrábění slinutými karbidy či řeznou keramikou a dosahovaná odolnost proti teplotnímu namáhání se blíží 1500°C.

Pro své vlastnosti, vysokou životnost a schopnost dosahovat vysoké jakosti povrchu, jsou vhodné jako nástroje nahrazující broušení třískovým obráběním. Je to z důvodu jak ekonomických, tak i ekologických.

Diamant

Díky vysoké vazebné energii kubické mřížky je nejtvrdějším známým materiálem. Diamanty dělíme v zásadě na dvě skupiny: přírodní a syntetické. Oba tyto druhy se vyskytují ve tvaru monokrystalickém a polykrystalickém. Synteticky vyrobené diamanty jsou výhodnější jak ekonomicky, tak i technologicky.

Nástroje a VBD osazené diamantem jsou používány pro obrábění neželezných kovů a slitin (hliník, měď, mosaz, bronz, titan a jejich slitiny). Jedná se vesměs o materiály, které nemají afinitu k uhlíku. Stále více jsou tyto nástroje nasazovány při obrábění keramických a plastických hmot s abrazivními plnidly, grafitové hmoty, gumy a jiné kompozitní materiály.

Porovnání některých mechanických vlastností řezných materiálů

Tab. 2.1 Porovnání některých vlastností řezných materiálů

Řezný materiál	Tvrдость [HV]	Pevnost		Modul pružnosti [GPa]	Rázová houževnatost [J/cm ²]	Součinitel vrubové houževnatosti K _{IC} [MPa/m ^{1/2}]
		v tlaku [MPa]	ohybu [MPa]			
RO	800	3600	2500	220	8	14
	1000	4200	4500	240	30	17
SK	1200	3000	1100	410	0,7	6
	1900	5000	2200	690	4	10
ŘK	2200	3500	500	380	0,3	1,5
	2500	4500	900	420	0,5	2,5
KBN	4500	3000	660	720		1
	6000	5000	1000			
PKD	6000	6000	500	1160		
	8000	8000	1000			



Kontrolní otázka

Jaké jsou základní požadavky kladené na řezné materiály?

Pro co jsou vhodné uhlíkové nástrojové oceli?

Jaké jsou výhody u rychlořezné oceli vyrobené práškovou metalurgií?

Vyjmenuj hlavní výhodou MTCVD technologie?

Vyjmenuj základní rozdělení řezné keramiky?



Použitá a doporučená literatura k dalšímu studiu – pro kapitoly 1 a 2

1. BILÍK, O. *Obrábění I.(2.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská–TU Ostrava, 2002. 80 s. ISBN 80-248-0033-0.
2. BILÍK, O. *Obrábění II.(1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská–TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
3. BILÍK, O. *Obrábění II. (2.Díl)*. Ostrava: Vysoká škola báňská–TU Ostrava, 2001. 118 s. ISBN 80-7078-994-1.
4. BRYCHTA, J. *Obrábění I. Návodů pro cvičení 1. část*. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 1998. 84 s. ISBN 80-7078-436-9.
5. BRYCHTA, J. *Obrábění I. Návodů pro cvičení 2. část*. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 1998. 120 s. ISBN 80-7078-470-9.
6. BRYCHTA, J. *Výrobní stroje obráběcí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 2003. 150 s. ISBN 80-248-0237-6.
7. KOČMAN, K. *Speciální technologie obrábění*. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1993. 213 s. ISBN 80-214-1187-2.
8. KOČMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.

9. KŘÍŽ, R., VÁVRA, P. a kol. *Strojírenská příručka*. Praha: Scientia, spol. s r. o., 1996. 220 s. ISBN 80-7183-024-0.
10. TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X.
11. VIGNER, M., PŘIKRYL, Z. a kol. *Obrábění*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1984. 808 s.
12. VLACH, B. a kol. *Technologie obrábění a montáží*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1990. 472 s. ISBN 80-03-00143-9.
13. HAVRILA, M., ZAJAC, J., BRYCHTA, J., JURKO, J. *Top trendy v obrábění 1. část – Obrábané materiály*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
14. JURKO, J., ZAJAC, J., ČEP, R., *Top trendy v obrábění 2. část – Nástrojové materiály*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
15. VASILKO, K., HAVRILA, M., NOVÁK – MARCINČIN, J., MÁDL, J., ZAJAC, J. *Top trendy v obrábění 3. část – Technológia obrábania*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
16. MONKA, P., PAULIKOVÁ, A. *Top trendy v obrábění 4. část – Upínanie, prípravky a meradlá*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2007. ISBN 80-968954-2-7.
17. PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1971. 200 s.
18. HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-1cast.pdf>.
19. HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 2. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004. 94 s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-2cast.pdf>.

20. HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část*. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program "Strojírenství". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 57 s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-3cast.pdf>.
21. HUMÁR, A. *Výrobní technologie II* [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru "Strojírenská technologie" BS studijního programu "Strojírenství". VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002. 84 s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobnTechnologie_II.pdf>.
22. AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
23. STEPHENSON, D. A., AGAPIOU, J. S. *Metal Cutting Teory and Praktice*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1996. 905 s. ISBN 0-8247-9579-2.
24. VASILKO, K., NOVÁK – MARCINČIN, J., HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 2003. 424 s. ISBN 80-7099-995-0.
25. PILC, J., STANČEKOVÁ, D. *Základy stavby obrábacích strojov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2004. 110 s. ISBN 80-8070-281-0.

3. EFEKTIVNÍ STRATEGIE OBRÁBĚNÍ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

Budete umět:

- Popsat efektivní strategie obrábění
- Detailněji popsat optimalizaci obrábění v CAD/CAM systémech
- Orientovat se ve volbě CAM systému

Budete umět

Budete schopni:

- Popsat simulace a kolize
- Popsat problematiku zbytkového materiálu
- Rozdělit postprocesory

Budete schopni

3.1. Efektivnost obrábění ve vztahu k obráběcímu stroji a řídicímu systému



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat efektivnost obrábění
- popsat zlepšující funkce pro CNC obrábění

Důležitým faktorem z hlediska efektivnosti obrábění je použití moderních obráběcích strojů. Metody a systémy adaptivního řízení, aktivní kontroly, diagnostiky a jejich nasazení na obráběcích strojích spolu s CAD/CAM systémy jsou předpokladem jak pro bezobslužný

provoz vysoce automatizovaných strojů, tak pro zajištění požadované přesnosti a spolehlivosti výroby a zvýšení ekonomických efektů.

Jako příklad jsou uvedeny některé nadstandardní úkony a vylepšení, které lze na moderních obráběcích strojích vykonávat:

- adaptivní řízení,
- aktivní kontrola,
- diagnostika,
- kompenzace deformace nástroje,
- aktivní kontrola rozměrů obrobku,
- identifikace stavu řezných nástrojů v průběhu řezného procesu,
- identifikace stavu a seřízení nástrojů mimo řezný proces,
- minimalizace teplotních deformací rámu strojů, aj..

Úkony, jako je možnost efektivně ovlivnit najetí a vyjetí bříty ze záběru, korekce správného odvodu třísek a zabraňování jejich hromadění, umožnění sklonu vřetene frézky – z důvodu zabránění tzv. dořezávání frézy, by měli v budoucnu patřit mezi běžné úkony při obrábění.

Řídicí systém je nedílnou součástí CNC stroje. Nově vyvinuté softwary umožňují řídit až 40 os, z toho 24 současně. Nově vyvinutý vysokorychlostní řídicí systém AI Nano CNC s vestavěnou sekvenční řídicí jednotkou PMC (Programmable Machine Control) dokáže vykonat jeden krok programu logického řízení za 25 ns a při tom lze vykonávat tři programy současně. Díky tomuto výkonu a funkčnosti je tedy ideální pro nejnovější špičkové stroje, které vyžadují komplexní funkce pro práci s více osami a více kanály při vysoké rychlosti pohybů. Mezi různými typy řídicích jednotek posunu je rozdíl především v předem načítaných blocích. Čím složitější je jednotka, tím více bloků načítá dopředu. Např. u AICC, HPCC a Nano HPCC je počet načítaných bloků 40, 180 až 600 [2]. To je obzvláště důležité u vysokorychlostního obrábění, kde se zpracovávají velice malé bloky. Pokud se malé bloky zpracovávají rychle, velký počet načítaných bloků dopředu (look-ahead) zaručí, že v řídicí jednotce bude dostatek dat. Nedostatek dat má za následek trhavý pohyb a tím i negativní vliv na výsledek obrábění. Nejnovější technologie umožnily dosáhnout rychlejších interpolačních cyklů, načítání až 1000 bloků dopředu pro přesnější řízení obrysu a dobu zpracování bloku

0,4 ms. Díky tomu, lze dosahovat vysoce kvalitního povrchu složitých forem s minimální nutností leštění po obrábění. V dnešní době jsou vyvíjeny speciální funkce CNC, které ovládají rychlost a posun, výrazně přispívají k dosažení vysoké kvality povrchu a k odstranění nutných dalších operací.

Požadavky kladené na CNC řídicí systémy:

- rychlost a přesnost,
- funkce ovládání,
- komunikace s okolím,
- diagnostika.

Zmiňované funkce zlepšují přesnost a rychlost obrábění, mezi ně patří například:

- Použití nanointerpolace – počítá žádanou hodnotu polohy v digitálním servosystému v nanometrech, i když je 1 μm nastaven jako přírůstek CNC.
- Nezávislé ovládání os – umožňuje zadávat různé hodnoty maximální rychlosti a zrychlení jednotlivým osám. V minulosti nejpomalejší osa určovala a ovládala vyladění pro celý stroj.
- Použití interpolace spline,
- Kompresor programů – funkce, pomocí něhož lze programy vytvořené z lineárních bloků konvertovat přímo v systému do bloků spline.
- Omezení zrychlení – funkce zajišťující omezení zrychlení. Je užitečná hlavně při obrábění oblouků s menším poloměrem. Velké oblouky dokáže stroj vyrobit rychle a přesně, zatím co u malých, z důvodu velkého zrychlení, existuje riziko odchýlení se od požadované kontury.
- Automatická detekce rohů - při požadavku vysoké přesnosti, nástroj odpovídajícím způsobem zpomalí v oblasti rohů. Pokud přesnost nehraje významnou roli, může nástroj obrábět v této oblasti s větší rychlostí. Tato funkce umožňuje uživateli přizpůsobit práci stroje požadované přesnosti.
- Funkce APC (Advanced Positron Control) – pomocí této funkce lze významnou měrou potlačit rezonanční frekvenci. Každý stroj má několik vlastních rezonančních

frekvencí, které vznikají uvnitř stroje v různých místech. Tyto rezonance omezují maximální rychlost stroje a zhoršují kvalitu obráběného povrchu.

- Ovlivnění zrychlení – pomocí zadaných příkazů lze ovlivňovat profil zrychlení. Např. povel Soft v řídicím systému Sinumerik 840D změní skokové zrychlení na lineární charakteristiku, čímž se prodlouží životnost stroje a zvýší se kvalita výrobku z důvodů potlačení rezonance stroje.

3.2. Simulace a verifikace



Čas ke studiu: 30 minut

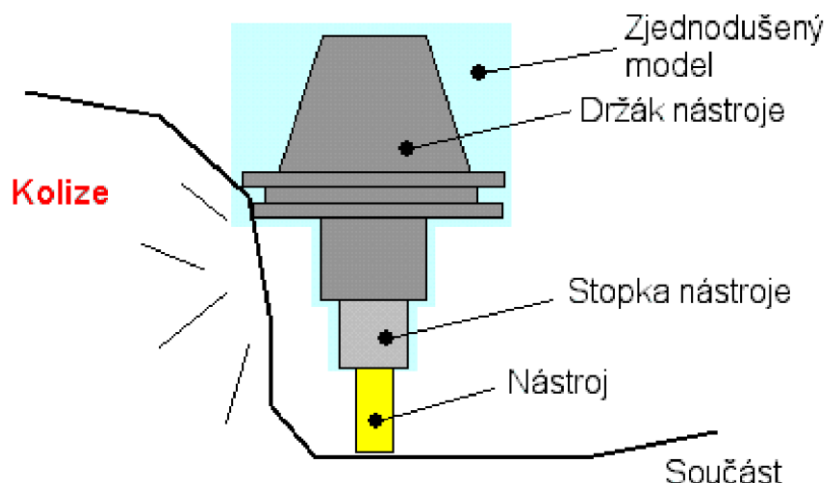


Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vysvětlit simulaci a verifikaci
- popsat problematiku obrábění zbytkového materiálu

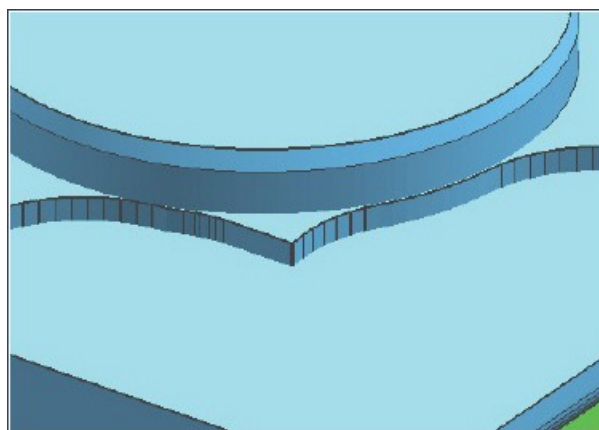
Širokou oblastí CAM programů, která ve značné míře přispívá ke zvyšování efektivnosti obrábění je kvalitní vizualizace a verifikace vytvořeného NC programu. Jednoduchá vizualizace a verifikace vytvořeného NC programu je již standardně vestavěna do většiny CAM programů. Pomocí této verifikace lze kontrolovat kolizi nástroje s obrobkem, nebo upínkami. Verifikace také analyzuje případný zbytkový materiál, nebo podřezání.

Někteří výrobci umožňují zakoupení dalších nadstaveb, pomocí kterých je možné simulovat a verifikovat kolize s materiálem a upínkami nejen pro držák nástroje a vřeteno, ale i kompletní výrobní stroj, včetně jeho plné geometrie a pohybů. Takové programy umožňují namodelovat nejen libovolné tvary nástroje, držáků, upínek, svěráků apod. a vybírat a ukládat je do knihoven, ale také pomocí speciálního modulu lze nadefinovat rozměry a kinematiku konkrétního stroje, importovat jeho řídicí systém a provést simulaci a verifikaci pohybů stroje. Protože namodelovaný stroj je ovládán stejnými řídicími funkcemi, chová se simulace stroje stejně jako reálný stroj v dílně. Tímto způsobem lze zvýšit spolehlivost obrábění a provést kontrolu funkcí stroje. Výhodou je prohloubení zkušeností programátorů a obsluhy bez vlastního použití stroje.



Obr. 30 Kolize držáku nástroje

Některé CAM systémy umí simulovat a verifikovat kolize s materiálem a upínkami, nejen pro držák nástroje a vřeteno, ale i kompletní obráběcí stroj, včetně jeho plné geometrie a pohybů. Takové programy umožňují modelovat libovolné tvary nástroje, držáků, upínek, svěráků apod. a ukládat je do knihoven. Pomocí speciálních modulů lze definovat rozměry a kinematiku konkrétního stroje, importovat jeho řídicí systém a provést simulaci a verifikaci pohybů stroje. Modelovaný obráběcí stroj je ovládán stejnými řídicími funkcemi, a proto se simulace stroje chová stejně jako reálný stroj v dílně. Tímto způsobem lze zvýšit spolehlivost obrábění a provést kontrolu funkcí stroje. Výhodou je prohloubení zkušeností programátorů a obsluhy bez vlastního použití stroje.



Obr. 31 Nedořezaný materiál - simulace v NX5

V případě výskytu kolizí, jsou hlášení o kolizích uspořádány a typově rozlišeny v samostatném okně. Některé simulátory např. AlfaCAM, SolidCAM umožňují nalezení

odpovídajících symbolů kolizí na příslušných řádcích NC kódu. Přejít na kolizní řádek se pak odehraje prostým kliknutím na pozici v databázi kolizí.

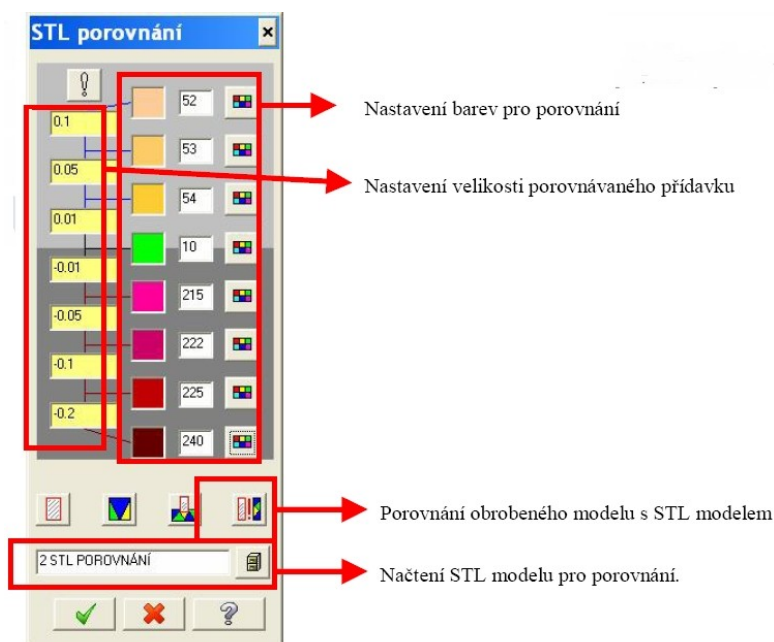
Dalším důležitým krokem při simulaci výroby je možnost vytvoření partu (modelu součásti) po jednotlivých operacích a následně ho použít jako polotovár pro další operace, nebo jako obrys (future) pro další modelování.

Některé systémy umožňují simulaci uložit do komprimovaného *.exe souboru. Tento soubor lze potom spustit a prezentovat na kterémkoliv počítači bez nainstalované aplikace příslušného programu. Toto vylepšení umožňují např. SolidCAM, EdgeCAM, MasterCAM a další.

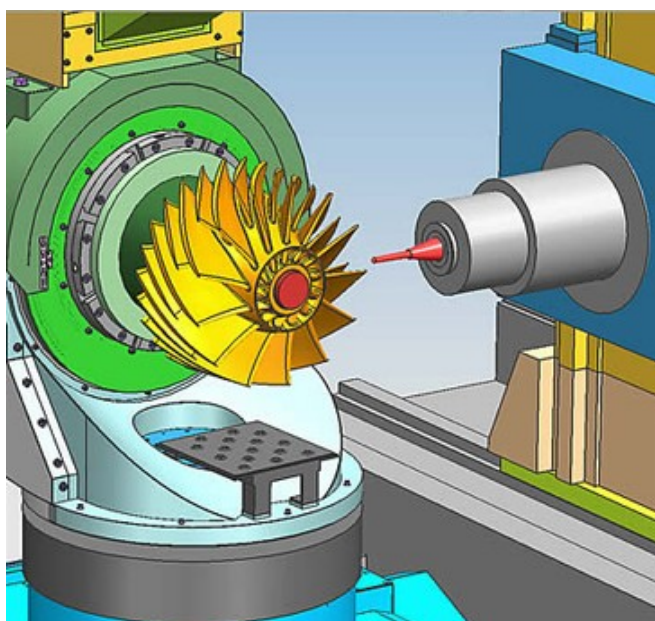
Shrnutí možností simulace obrábění:

- kontroluje kolize mezi nástrojem, stopkou nástroje, držákem nástroje včetně a obrobkem a upínkami,
- analýza podřezání,
- analýza geometrie a pohybů stroje,
- vytvoření modelu součásti po jednotlivých operacích:
- jako polotovár pro další operace,
- jako obrys pro další modelování,
- analýza velikosti zbytkového materiálu (přesnosti obrobeného povrchu),
- porovnání obrobené součásti s modelem - možnost barevného a číselného zobrazení velikosti rozdílu,
- provádění řezů na obrobeném tvaru a odměřování,
- uspořádání a typově rozlišení kolizí,
- možnost vytvoření obrys (future),
- uložení simulace do *.exe souboru, a další.

Simulace nástrojů a držáků v CAM systémech jsou nepostradatelnou součástí CAD/CAM systému. Umožňují virtuální pohled na průběh obrábění a zamezí tak případné kolizi držáku nástroje s obrobeným materiálem nebo upínačem.



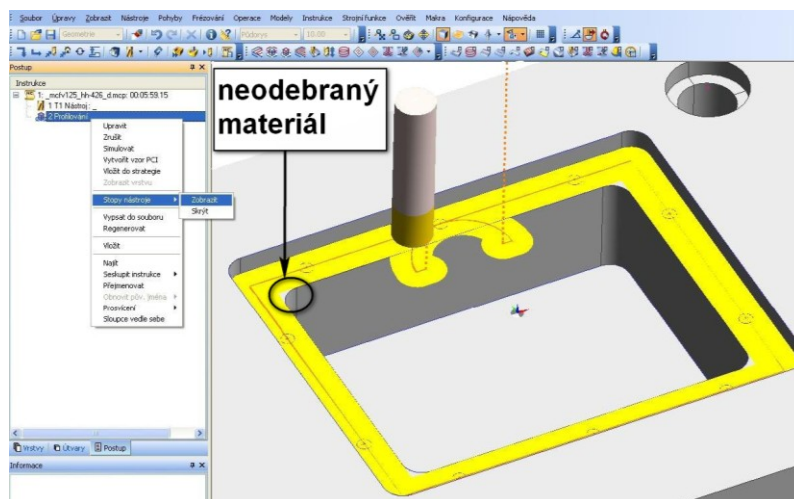
Obr. 32 Porovnání modelu s obrobkem (MasterCAM)



Obr. 33 Ukázka simulace obrábění v NX

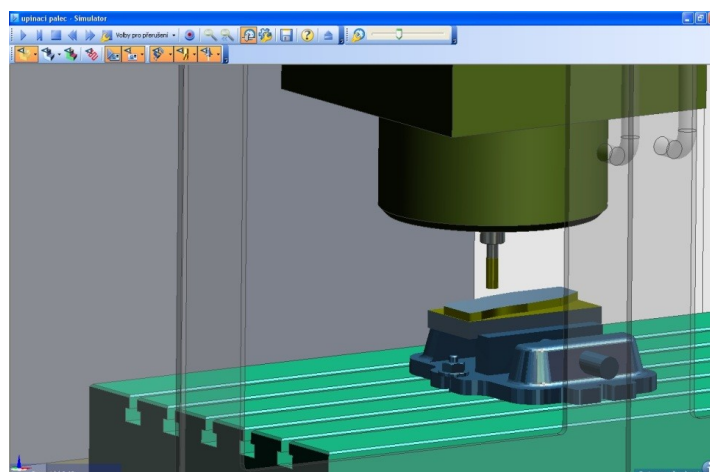
Simulátor EdgeCAM poskytuje možnost úplného ověřování frézování a soustružení s prostorovým zobrazením stroje a jeho prvků, čímž se zkvalitní zobrazení průběhu obrábění. V simulaci jsou vidět vazby a polohy nástrojů a držáků vzhledem k upínačům a prvkům na stroji, čímž se zlepšují podmínky pro kontrolu a odstraňování kolizí.

Následující obrázek ukazuje zobrazení stop po nástroji bez nutné pokročilé simulace, kde v rozích dutiny (v kroužku) je vidět neodebraný materiál.



Obr. 34 Zobrazení stop nástroje (EdgeCAM – zjednodušená simulace)

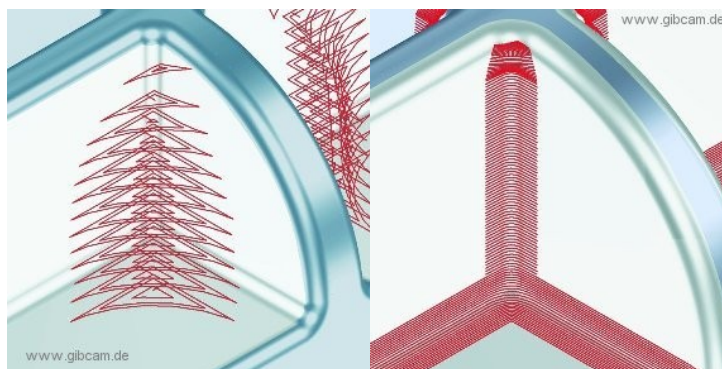
Jedním z největších dodavatelů verifikací pro jednotlivé CAM moduly je firma MachineWorks se svým produktem CNC Simulation & Verification v 6.0. Ten využívá jako modul pro simulaci řada CAM systémů, např.: Catia, Climatron E, Edge CAM, Esprit, HyperMill, MasterCAM a jiné. Podobně jako řada jiných se i tento software skládá z jednotlivých modulů. Uživatel si může zvolit, jaký stupeň simulace potřebuje. Mezi další programy pro vizualizaci výroby patří Vericut a Predator. U těchto systémů lze načíst G kód (ISO kód, dialog) a CAD/CAM systém vytvoří NC dráhu nástroje (APT, CL data).



Obr. 35 Prostředí EdgeCAM – modul pokročilá simulace

Obrábění zbytkového materiálu

Po odebrání největšího množství materiálu v nejkratším čase se tentýž nástroj využije pro obrobení vypočítaného zbytkového materiálu a to při zjemnění kroků a zmenšení „schodů“ na obrobku. Avšak již vykonává objížděním kontur v konstantních „Z“ rovinách, nikoliv odebráním materiálu z celého obrobku, protože okolní materiál byl již odstraněn. Při použití menšího průměru frézy dojde k obrobení jen těch částí, které nemohly být z důvodu velkého průměru frézy, nebo špatného přístupu nástroje obrobny. Nástroj neprovede kontinuální obrobení celého povrchu modelu, ale jen těch částí, které zůstali neobrobny. Tím se podstatně zkrátí strojní čas na výrobu dané součásti. Celý cyklus je tak výrazně kratší, než kdyby stejným krokem proběhla hrubovací, či dokončovací operace v celku. Některé systémy dovedou vyhledat zbytkový materiál automaticky a navrhnou sami nejvýhodnější volbu strategie doobrobení. Jiné dokáží vyhledat tzv. zbytkové křivky, na které si operátor sám aplikuje funkci doobrobení materiálu.



Obr. 36 Obrábění zbytkového materiálu

3.3. Vztah CAD/CAM systémů k HSC obrábění



Čas ke studiu: 20 minut



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat CAD/CAM systémy v obrábění

Tato kapitola uvádí stručnou anotaci k široké problematice, která bude podrobněji popsána v navazujícím vydání těchto skript s názvem CAD/CAM systémy v obrábění II.

Nasazení NC technologií bývá v poslední době také spojováno s nasazením HSC technologií. HSC technologie lze využít tam, kde dochází k větším odebíraným objemům materiálu a zároveň je nutné dosáhnout hospodárně vysoké kvality povrchu po obrobení. Příkladem jsou oblasti výroby forem a zárustek. Tímto způsobem se mohou též nahradit výrobní procesy s nedefinovanou geometrií břitu procesy s definovanou geometrií břitu. Uživatel k úspěšnému nasazení takových technologií potřebuje výkonné NC stroje s CNC řízením vybavené příslušnými funkcemi. Je nutné brát ohled na dynamiku stroje na přizpůsobení posunových mechanismů a na vysokootáčkové vřetená. K tomu je třeba, aby stroj byl vybaven kvalitními nástroji, držáky nástrojů, řídicím systémem a v neposlední řadě CAM systémem.

Jednou z možností zvýšení bezpečnosti HSC procesu a zároveň zkrácení strojních časů při frézování je použití optimální strategie frézování. Tyto strategie jsou charakterizovány tím, že zabráňují prudkým změnám směrů drah nástroje, orientují se na topografii povrchu obrobku, realizují šetrný pohyb nástroje při najíždění nástroje do řezu a při zanořování nástroje do materiálu (např. rampování) a zajišťují sousledné obrábění, apod. Mezi tyto strategie patří např. trochoidní dráha nástroje, strategie Truemill (SurfCAM) apod. a různé způsoby nájezdu do řezu (po kružnici, tečně k povrchu), rampování (šikmé zajiždění nástroje do řezu), řádkování, obvodové frézování v z-hladinách od středu ven nebo naopak, okružovací frézování ve šroubovici aj. Výsledkem použití těchto způsobů obrábění je dosažení optimálních strojních časů, technologicky přijatelného procesu, rovnoměrných záběrových podmínek nástroje – s tím spojené zvýšení trvanlivosti nástroje a plynulé navázání drah

nástroje. Všechny tyto výsledky se pozitivně promítnou v praktickém nasazení ohledně celkových časů obrábění a dosažené kvality povrchu.

Při změně posuvové rychlosti např. z $8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ na $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, v důsledku zaregistrované prudké změny hloubky řezu (při zrychlení stroje 1g), je čas potřebný na zpomalení posuvu 11,7 ms. To odpovídá brzděné dráze 0,68 mm. [9]

I když počáteční rychlost klesne na polovinu je brzděná dráha 0,13 mm. K tomu je třeba ještě připočíst zde zanedbané reakční doby senzorů, které tyto dráhy ještě prodlužují [9].

3.4. Optimalizace obrábění v CAD/CAM systémech



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat možnosti optimalizace obrábění v CAD/CAM systémech
- vysvětlit využití senzorů
- popsat problematiku korekce posuvů

Tato kapitola popisuje možnosti využití CAD/CAM systémů a různých speciálních programů, pro optimalizaci obrábění. Optimalizace obrábění je velmi složitý proces.

Použitím optimalizačních programů při obrábění lze hlavně docílit:

- zkrácení času obrábění,
- zvýšení trvanlivosti nástroje,
- zvýšení efektivnosti obrábění,
- stabilitu obrábění - omezení chvění apod.

Optimalizační program může být začleněn v samotném CAD/CAM systému nebo mohou být optimalizovány řezné podmínky v rámci postprocesingu. Další možnou formou je začlenění optimalizace řezných podmínek prostřednictvím uživatele, který funguje jako komunikační prvek mezi CAD/CAM systémem a optimalizačním programem (tj. samostatným programem aplikujícím teorie optimalizace).

Optimalizaci obrábění ve vztahu k CAD/CAM systému lze rozdělit:

- optimalizace začleněna v samotném CAD/CAM systému,
- optimalizace v rámci postprocesingu,
- samostatný program aplikující teorii optimalizace (uživatel - optimalizační program - CAD/CAM systém).

Optimalizace procesu obrábění se vztahuje (jinými slovy – Co se optimalizuje?) zejména na tři základní řezné podmínky:

- řeznou rychlost v_c ,
- posuv f ,
- hloubku řezu a_p .

Dále pak se optimalizace obrábění vztahuje na:

- šířku řezu a_e ,
- počet záběrů i ,
- řezné prostředí,
- řezivost nástroje (materiál břitu nástroje, geometrie břitu, povlak apod.),
- způsob upnutí, atd..

Optimalizace zmiňované v CAM systémech jsou vztahovány převážně na dráhy nástroje, nebo na určení řezných podmínek z určité databáze. Není to optimalizace, jež je popsána v odborné literatuře týkající se teorie obrábění. Ta je převážně vztahována na řezné podmínky, jako jsou řezná rychlost, posuv, hloubka a šířka řezu a počet úběrů.

Výpočet optimálních řezných podmínek je dosti náročný. Optimalizace se vyjadřuje pomocí třech základních kritérií:

- kritérium minimálních výrobních nákladů,
- kritérium maximální výrobnosti,
- jednotlivá technická omezení.

CAD/CAM systém umožňuje provádění analýzy úseku NC programu a zobrazení výsledků optimalizace. Optimalizovaný NC-program je potom možné důkladně studovat.

Jednotlivé velikosti posuvů jsou přehledně zobrazeny v různých barvách, přičemž je možné provádět analýzu těchto úseků dráhy nástroje. Tabulky úspory času ukazují původní délku a čas před optimalizací a délku a čas obrábění po optimalizaci.

Upravením rychlosti posuvu, např. při frézování v rozích požadovaného tvaru, lze zabránit vibracím, tedy rozechvění frézy. V rozích obráběného tvaru dochází k velké zátěži, protože asi 1/4 nástroje je ve styku s obrobkem.

Použití optimálních strategií samotné ještě nestačí pro dostatečnou bezpečnost procesu při bezobslužném plně automatizovaném obrábění. Moderní CAM systémy jsou sice v pozici, že dokáží rozpoznat zbytkové objemy materiálu po předchozím obrábění, ale zbývají stále ještě kritické záběrové podmínky na strmých plochách nebo v rozích, které při konstantní velikosti posuvu mohou vést k přetížení nástroje, což může způsobit i zlomení tohoto nástroje. Řešením tohoto problému je přizpůsobení posuvu záběrovým podmínkám. Principiálně jsou myslitelné dva způsoby a to on-line a off-line systémy.

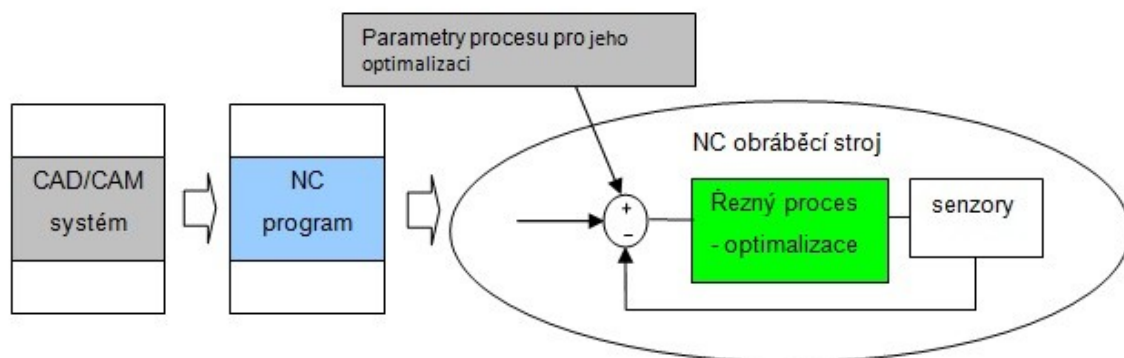
On-line systémy charakterizují tzv. dřívější způsoby adaptivních řízení u NC strojů (mezní (ACC) nebo optimalizační (ACO)). Nevýhodou těchto systémů je použití různých druhů senzorů, např.:

- piezoelektrické snímače řezných sil a momentů,
- piezoelektrické akcelerometry pro měření zrychlení a vibrací,
- termistorové sondy pro monitorování teplotních poměrů strojů a jejich agregátů,
- videokamery pro globální sledování řezného procesu,
- interferometry se senzory s optickými vlákny pro měření kvality obráběných a obrobených povrchů, aj.

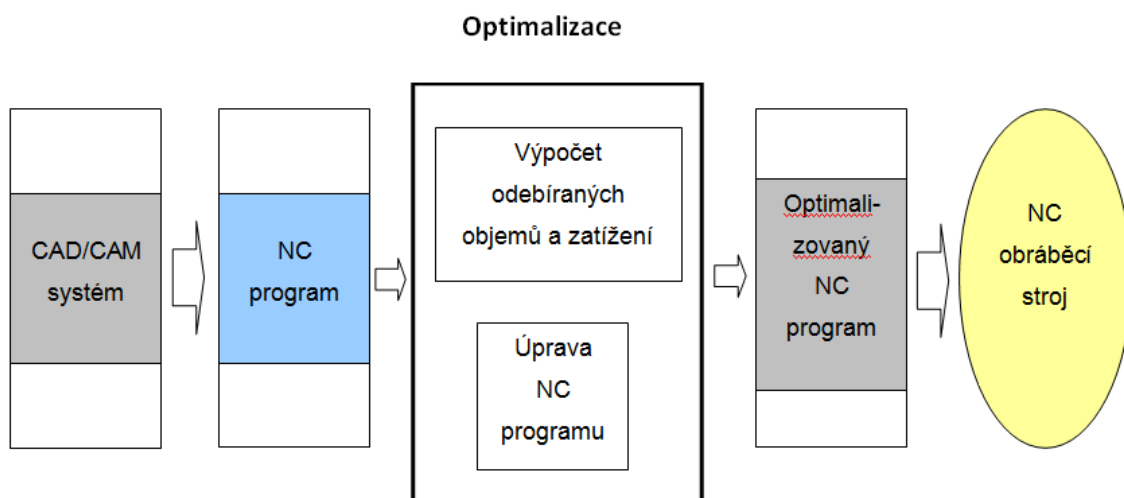
Tyto senzory se využívají při monitorování řezného procesu pro zachování zpětné vazby, která je nutná pro vyrovnávání požadované a skutečné (monitorované) velikosti sledovaného parametru v procesu obrábění. S tímto vybavením samozřejmě roste i celková cena stroje. Mimo jiné dochází při skokové změně přídavku na obrábění k jisté setrvačnosti předchozí posuvové rychlosti, což má za následek nárazové zatížení nástroje [9].

Použitím off-line systémů se dá zmíněná setrvačnost posuvové rychlosti odstranit. Znakem těchto systémů je analýza procesu obrábění předem, tj. před začátkem reálného obrábění, kdy se dopředu rozpoznají pozice a zatížení virtuálního nástroje na základě

záběrových podmínek (symetrie záběru, úhlu sklonu dráhy, kontaktního úhlu při záběru aj.) a odebíraných objemů v každém segmentu NC programu, což sníží vyskytující se napět'ové špičky v nástroji při konstantním posuvu. Kromě již zmíněné bezpečnosti při obrábění se ještě zvýší úspora celkových časů obrábění asi o 20% i více, protože se nemusí usilovat o co největší volbu konstantní posuvové rychlosti, ale stačí pouze určit interval velikostí posuvů, které budou následně v NC programu podle záběrových podmínek generovány [9].



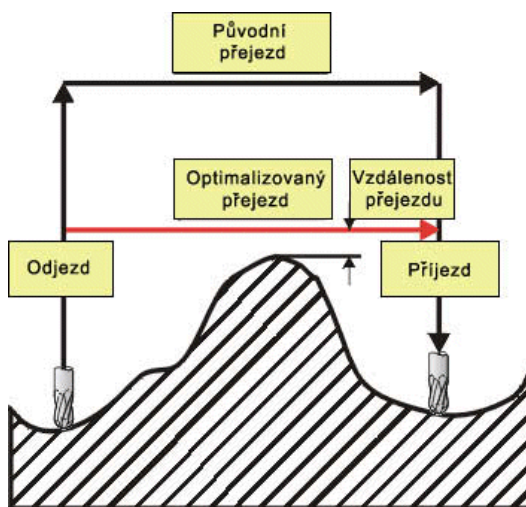
Obr. 37 Schéma on-line systému pro optimalizaci procesu obrábění [9]



Obr. 38 Schéma off-line systému pro optimalizaci procesu obrábění [9]

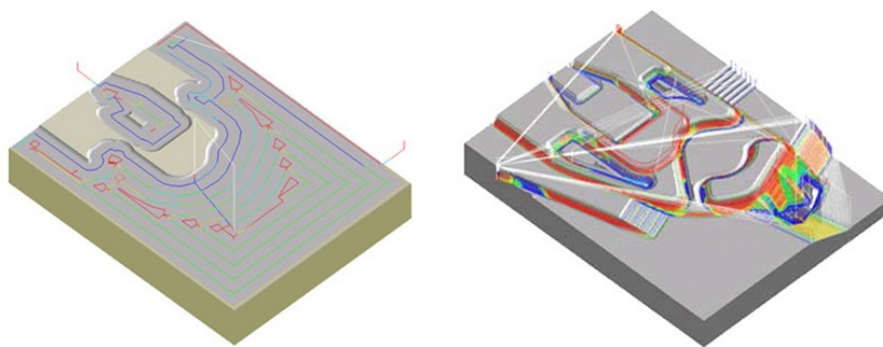
Jedním z offline – systémů je produkt Ncspeed, který je vyvíjen a distribuován firmou FORMTEC. Tento systém pracuje tak, že analyzuje NC programy již vytvořené v některém CAM systému a poté je optimalizuje. Tím se dosáhne kromě optimálního využití stroje též spolehlivého a stabilního obráběcího procesu.

Výsledkem práce je originální soubor vytvořený v CAD/CAM systému a nový NC program s optimalizací, vytvořený tímto speciálním optimalizačním programem. Program využívá optimalizaci velikostí posuvů, drah posuvů a přejezdů viz. následující obr..



Obr. 39 Optimalizace přejezdů

Zpracovávat je možné veškeré možné NC programy včetně dialogu u řídicího systému Heidenhain. NCspeed propočítává objemy odebíraného materiálu a přizpůsobuje rychlost posuvu a otáčky vřetene podle aktuálního zatížení frézy. Nedovolená vysoká zatížení se tím zredukují. Na následujícím obrázku je znázorněna simulace procesu hrubování tvaru formy. V kritických oblastech byl posuv značně zredukován.



Obr. 40 Znázornění velikosti posuvů u drah nástroje při hrubování a dokončování
v programu NCspeed [24]

V nekritických oblastech se posuv naopak zvýší. Tvar obrobene plochy obrobku po hrubování je východiskem pro optimalizaci u polodokončovacích a dokončovacích operací.

Možnosti optimalizačních programů jsou:

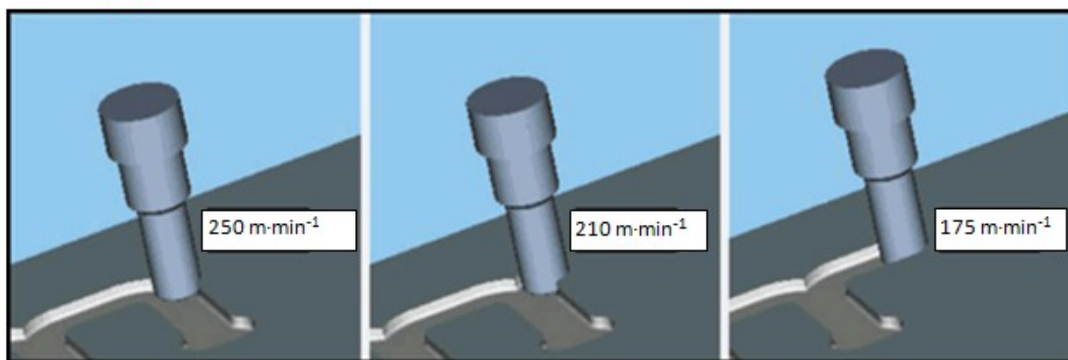
- vizualizace odběru materiálu při kontrole NC programů,
- optimalizace NC programů přizpůsobením rychlostí posuvů na základě dílčích záběrových podmínek nástroje,
- zpracování NC programů v DIN/ISO, „Dialog“ u systému Heidenhain, Fidia – Format,
- zpracování kruhových oblouků,
- volitelné speciální přizpůsobení průběhu obrábění při vrtání a frézování,
- zohlednění kritických situací, jako je nesousledné frézování a velký úhel opásání při záběru,
- optimalizace drah nástroje, kde nedochází k úběru materiálu „obrábění vzduchu“,
- volitelné přizpůsobení otáček vřetena.

Dalším z komplexnějších systémů off-line je systém Vericut [27], který patří do skupiny NC verifikačních softwarových programů. Pomocí tohoto softwaru lze komplexně virtuálně simulovat NC obrábění. Vericut dokáže podobně jako NCspeed zpracovávat NC programy již vytvořené v některém z CAM systémů. Pro optimalizaci je vybaven tzv. optimalizačním modulem OptiPath©, který je patentem firmy CGTech. OptiPath© používá různých metod pro optimalizaci v závislosti na druhu obrábění. Software Vericut je vybaven rozsáhlou znalostní databází koeficientů určených pro optimalizaci, které byly experimentálně získány velkým počtem analýz průběhu obrábění pro oblast nejčastěji používaných materiálů a řezných nástrojů. Konečné hodnoty koeficientů jsou přepočítávány k aktuálnímu průměru použitého nástroje, počtu zubů, otáčkám atd. Přehlednost je podpořena interním kalkulátorem a testem úběru schopnými podat uživateli v okamžiku úplné informace o parametrech obrábění. Systém poskytuje velké množství potřebných informací týkajících se např. potřebného výkonu, odebíraného objemu, pro aktuální parametry řezu a použitý nástroj[27].

Optimalizační modul softwaru Vericut dovoluje optimalizovat průběh obrábění několika rozdílnými způsoby. První možností pro úpravu zdrojového NC kódu je korekce řezných podmínek při zachování kritéria konstantní hodnoty odebíraného objemu materiálu v průběhu operace. Následující možností korekce řezných podmínek je korigování na základě koeficientů závislých na tabulkách obsahujících hloubky, šířky a sklonu záběru nástroje.

Tabulky týkající se hloubky a šířky záběru nástroje jsou procentuelně rozděleny na několik stupňů, kterým odpovídají jednotlivé koeficienty vstupující jako korekce do NC kódu. Další tabulka obsahuje hodnoty pro rozličné úhly sklonu pohybu nástroje v řezu, které se také následně promítají do korekcí řezných podmínek. Pohyb nástroje je rozdělen do skupin podle úhlu trajektorie nástroje a těmito skupinám odpovídají příslušné korekční koeficienty. Nabídka nástrojů optimalizace je doplněna o korekci řezných podmínek při zachování konstantní řezné rychlosti v bodě dotyku nástroje a povrchu obráběné součásti.

Pro metody HSC je OptiPath© vybaven optimalizací, kde je kritériem optimalizace konstantní tloušťka třísky. Výčet všech možností doplňuje optimalizace přejezdů mimo materiál [26].



Obr. 41 Korekce posuvů v systému Vericut za pomoci optimalizačního softwaru OptiPath© při najíždění nástroje do plného materiálu [27]

Optimalizace výrobního procesu je trvalý úkol pro manažery strojírenských firem. Efektivní řešení problémů není možné bez úzké spolupráce s dodavateli produktů - strojů, nářadí a softwaru. Dodavatel, který sice včas dodává, ale nemá schopnost spolupracovat, rozvíjet a žije pouze z partnerské tradice, není pro zákazníka zárukou dalšího rozvoje. Je třeba žádat komplexní provázanou podporu předvýroby a výroby směřující ke zvyšování produktivity a snižování nákladů.

3.5. Volba CAM systému



Čas ke studiu: 7 minut



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat volbu CAM systému

V dnešní době je již k dispozici celá řada CAD/CAM systémů a záleží na uživateli (respektive společnosti), který si z této velké škály zvolí pro svůj sortiment výroby. Volba CAD/CAM systému závisí na spoustě faktorů, které uživatel musí brát v úvahu.

Mezi tyto faktory patří zejména:

- sortiment výroby,
- strojový park,
- ekonomické hledisko,
- softwarové a hardwarové vybavení společnosti,
- problematika postprocesorů,
- zkušenosti uživatelů s jinými CAD/CAM systémy,
- technická podpora při tvorbě programů,
- podmínky zaškolování programátorů,
- podmínky aktualizace softwaru, a jiné.

Pro usnadnění volby toho správného CAM systému by přispěl odborný test těchto softwarů provedený přímo v praxi. Test srovnání CAM systémů by byl velmi složitou a nákladnou záležitostí. Takový test provedla francouzská organizace CETIM v roce 2003. Testu se zúčastnilo 9 CAM systémů zaměřených na HSC frézování. Byl zkoumán rozsah použití těchto systémů pro HSC frézování zápustek a forem.

Prováděná porovnání se zaměřovala na počet potřebných operací a nástrojů, čas frézování, dosaženou drsnost povrchu a finanční analýzu CAM systémů. V tomto testu se součástka

(„mezinárodní testovací díl 3D formy“) zhotovovala na 3 osé vertikální frézce. Obrobek je součástí automatické převodovky. Jedná se o držák formy v odstříhavadle, které je zabudováno v odstříhovacím lisu. Geometrie součástky byla zvolena k testovacím účelům s ohledem na různé způsoby obrábění.

3.6. Vliv segmentace trajektorie pohybu nástroje na efektivnost obrábění



Čas ke studiu: 25 minut



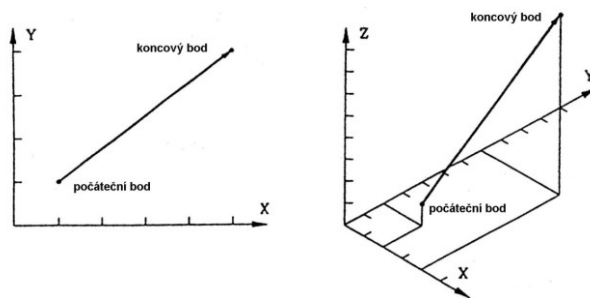
Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat vliv segmentace trajektorie pohybu nástroje na efektivnost výroby
- detailněji popsat interpolace

Elementární pohyby, ze kterých se vygeneruje popis celkové dráhy nástroje, se v CNC řídicích systémech většinou rozdělí na úseky přímkové, rovinné, prostorové a kruhové rovinné. Složitější pohyb nástroje je nutné segmentovat nejčastěji na jednotlivé přímkové úseky. V závislosti na přesnosti aproximace obecné trajektorie pohybu řezného nástroje polygonální čarou, roste buď počet bloků v NC programu a tím nároky na kapacitu vnitřní paměti CNC systému, nebo nepřesnost obrábění. Jednotlivé interpolace lze rozdělit na následující typy [22]:

➤ Lineární interpolace

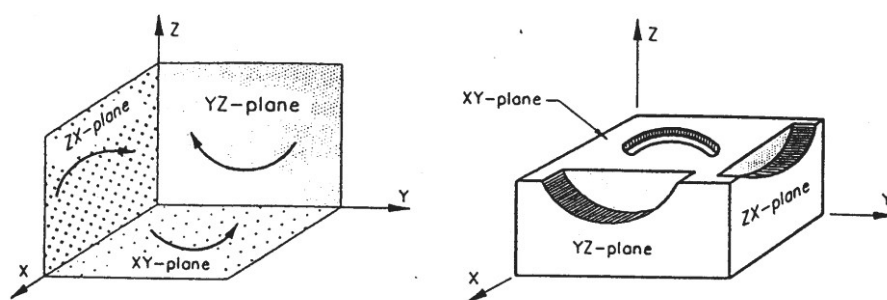
- nástroj se pohybuje z výchozího do konečného bodu po úsečce. Přímka může v rovině, či prostoru nahrazovat křivku. Na Obr. 41 je zobrazena lineární interpolace ve 2-D a 3-D prostoru.



Obr. 42 Lineární interpolace [23]

➤ Kruhová interpolace

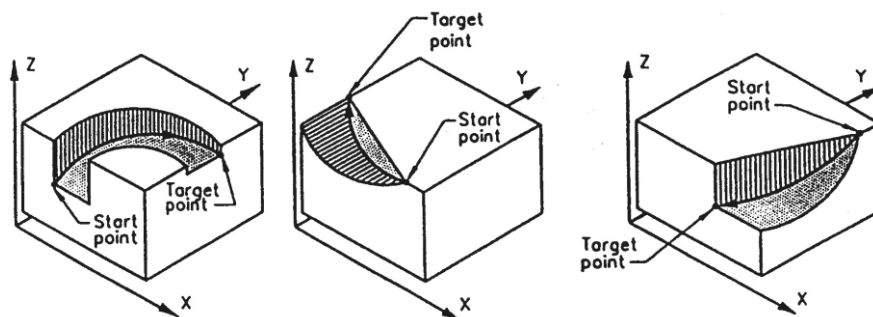
- nástroj se pohybuje po kružnici (oblouku) ve třech základních rovinách.



Obr. 43 Kruhová interpolace [23]

➤ Šroubová interpolace

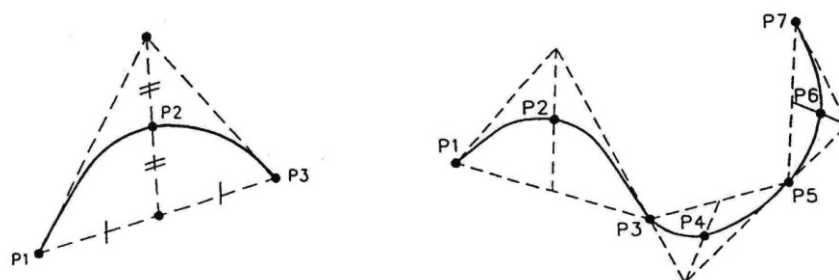
- tato interpolace kombinuje kruhovou interpolaci v jedné ze základních rovin a interpolaci lineární ve směru kolmém na tuto rovinu. Šroubová interpolace může být ve třech provedeních: oblouk v rovině XY a lineární interpolace podél osy Z, oblouk v rovině YZ a lineární interpolace podél osy X, oblouk v rovině ZX a lineární interpolace podél osy Y.



Obr. 44 Šroubová interpolace [23]

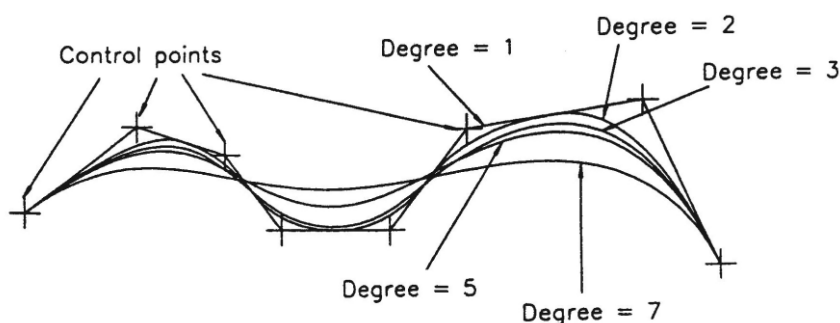
➤ Parabolická interpolace

- nástroj se pohybuje po parabole vytvořené pomocí tří nekolineárních bodů. Nahrazení vícestupňových křivek lze použitím dvou a více parabolických částí. Parabola úsporněji aproximuje aerodynamické tvary – křivky, plochy. Z toho důvodu lze parabolickou interpolaci s výhodou užívat např. při výrobě křídel letadel, lisovacích forem pro karosérie automobilů apod.



Obr. 45 Parabolická interpolace [23]

➤ Spline interpolace



Obr. 46 Spline interpolace [23]

Běžné CNC stroje podporují lineární, kruhovou a šroubovou interpolaci. Jen málo CNC strojů umožňuje v současné době využívání parabolické a spline interpolace.

Komplikace přechodů polygonálních čar je řešitelná změnou definice jednotlivých ucelených drah pohybu řezného nástroje (v NC programu) pomocí popisu dráhy obecnými hladkými křivkami vyšších řádů. Tyto nové techniky v CNC řídicích systémech jsou různé formy spline interpolace, jejichž zvládnutí bezesporu přispívá ke zvyšování přesnosti a jakosti obrobenej plochy[23].

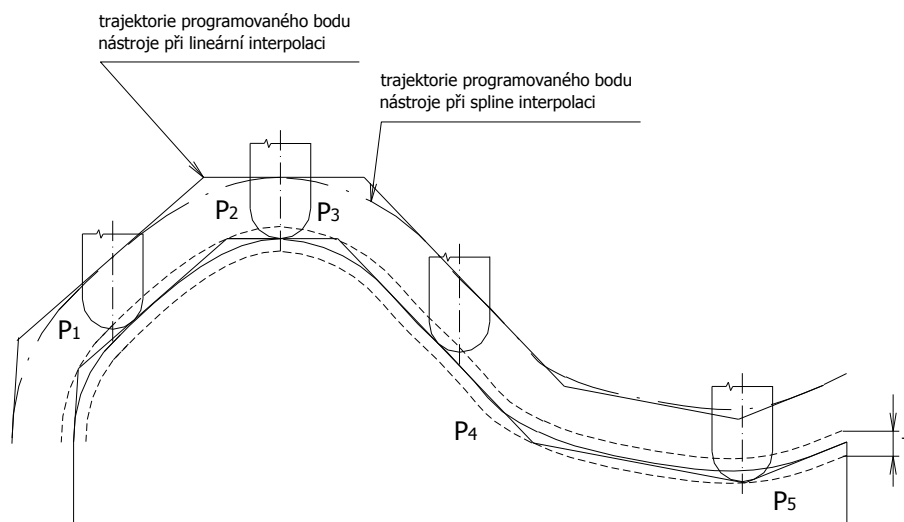
Obecná trajektorie pohybu nástroje má velký vliv na proces obrábění. Využití CAD/CAM systému je pro přípravu NC programů pro obrábění složitých tvarových ploch nezbytnou

součástí. Důležitým parametrem, který by měl možnost technolog, programátor NC programů zadávat, je přesnost obrábění. Pro tento případ je to vlastně maximální odchylka od tětiny, kde tento parametr má přímý vliv na aproximaci obecné dráhy nástroje. Jestliže však křivka dráhy nástroje obsahuje inflexní body, potom také vzrůstá neúměrně délka elementárních segmentů dráhy nástroje, což může v konečné podobě vést k nepřesnostem ve vztahu k hladkosti přechodu obrobených ploch.

Čas potřebný ke zpracování informace v bloku je dalším faktorem, který je nutný brát v úvahu ve vztahu ke segmentaci výsledné dráhy u zvlášť velkých posunových rychlostí. Může vzniknout případ, kdy vlivem velmi jemné mikrosegmentace dojde ve více souvisle řízených osách k tomu, že potřebný čas zpracování je delší (u současných moderních CNC systémů 1 až 10 ms), než čas aktivního výkonu pohybu nástroje v předchozím bloku NC programu. Tento stav má za následek neklidný, trhavý pohyb stroje, což se negativně projeví nejen na výsledné obrobené ploše, ale také na trvanlivosti břitů řezných nástrojů a zbytečném dynamickém namáhání příslušných pohonů jednotlivých řízených os [21].

Problematika prudkých změn směru zrychlení v jednotlivých řízených osách stroje je také spojena se segmentací křivek. Tyto prudké změny směru zrychlení jsou způsobeny ostrým přechodem mezi jednotlivými segmenty dráhy, programovanými jednotlivě v každém bloku. Přechody na hranách polygonu mohou zapříčinit kmitání, popř. rázy ve stroji, což může vést k extrémním zatížením pohonů v jednotlivých řízených osách. I tento jev se negativně projeví na jakosti a přesnosti obrobené plochy. Proto využívání spline interpolace vede ke vzniku povrchů blížících se návrhu v systému CAD.

Spline interpolace eliminuje nevýhody lineární interpolace. Praktická zkušenost ukazuje, že pro dostačující přesnost je možné nahradit 5 až 10 lineárních bloků jedním segmentem spline [7]. Na následujícím obrázku je srovnávána lineární interpolace s interpolací spline.



Obr. 47 Trajektorie pohybu nástroje při lineární a spline interpolaci [22]

U některých řídicích systémů se můžeme setkat s funkcí kompresoru programů, pomocí něhož lze programy vytvořené z lineárních bloků konvertovat přímo v systému do bloků spline. Tímto způsobem můžeme dosáhnout zvýšení rychlosti obrábění a zkvalitnění povrchu obrobku. Funkce kompresoru se využívá i u pětiosých obráběcích strojů. Orientaci nástroje lze programovat pomocí směrových vektorů. Touto funkcí kompresor podporuje zpracování programů generovaných v CAD/CAM systémech. Bez kompresoru jsou změny orientace nástroje lineárně interpolovány, což vede k rázům zejména na přechodech mezi bloky.

Vyvstává otázka, do jaké míry je tento ideální návrh v modulu CAD odlišný od skutečného změřeného rozměru?

3.7. Postprocesor – Postprocessing



Čas ke studiu: 35 minut



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat postprocesory
- rozdělit postprocesory

Otázka postprocesorů je u CAM programů vždy důležitá. Co je vlastně postprocessing? Jednoduše řečeno, jde o překlad INC souborů (tedy již vygenerovaných drah nástroje) do řeči srozumitelné příslušnému řídicímu systému obráběcího stroje. Ve světě i u nás je mnoho řídicích systémů, včetně jejich nejrozličnějších variant. Požadavky na postprocessing tedy vycházejí vždy od konkrétně použitého stroje. Důležitá je možnost postprocesory uživatelsky upravovat, konfigurovat, aby se jejich práce mohla přizpůsobit různým místním mutacím a zvyklostem. Některé CAD/CAM systémy umožňují modifikaci a úpravu postprocesorů. Důležitou součástí pětiosého obrábění je inteligentní generátor postprocesorů.

Procesor vygeneruje APT nebo, **CL data** (*Cutter Location Data*) - „jakýsi program“ pro řízení „ideálního“ NC stroje.

CL data je třeba přizpůsobit technickým možnostem a formálnímu tvaru zadávaného programu pro konkrétní dvojici řídicí systém a stroj.

Postprocesor přeloží vygenerované CL DATA (tedy již vygenerované dráhy nástroje) do řeči srozumitelné příslušnému řídicímu systému obráběcího stroje



NC program

Jinak řečeno, po dokončení tvorby všech obráběcích cyklů a po bezkolizové simulaci obrábění se vygeneruje pouhým stisknutím příslušné ikony NC kód. Pro vytvoření NC kódu použije CAM systém generátor NC kódu, který převede vytvořený technologický postup do instrukcí daného stroje a řídicího systému. Generátor NC kódu zapíše instrukce do ASCII

textového souboru. Tento soubor je možné ještě před odesláním do stroje upravovat. K úpravě se využije buď speciální NC editor dodávaný např. s balíčkem produktů CAM, nebo jednoduchý program, který je na každém počítači – např. poznámkový blok.

Uživatel má v podstatě tři způsoby jak postprocessor získat:

1. objednání postprocesoru „na míru“ u odborné firmy (většinou firmy distribuující CAM systém),
2. vyhledání v databázi existujících zákaznických postprocesorů CAM systému svého prodejce a porovnávat, který z nich v jeho podmínkách bude bezchybně pracovat,
3. vytvoření vlastního postprocesoru (Např. pomocí speciálního modulu CAM systému tzv. konstruktéra postprocesoru).

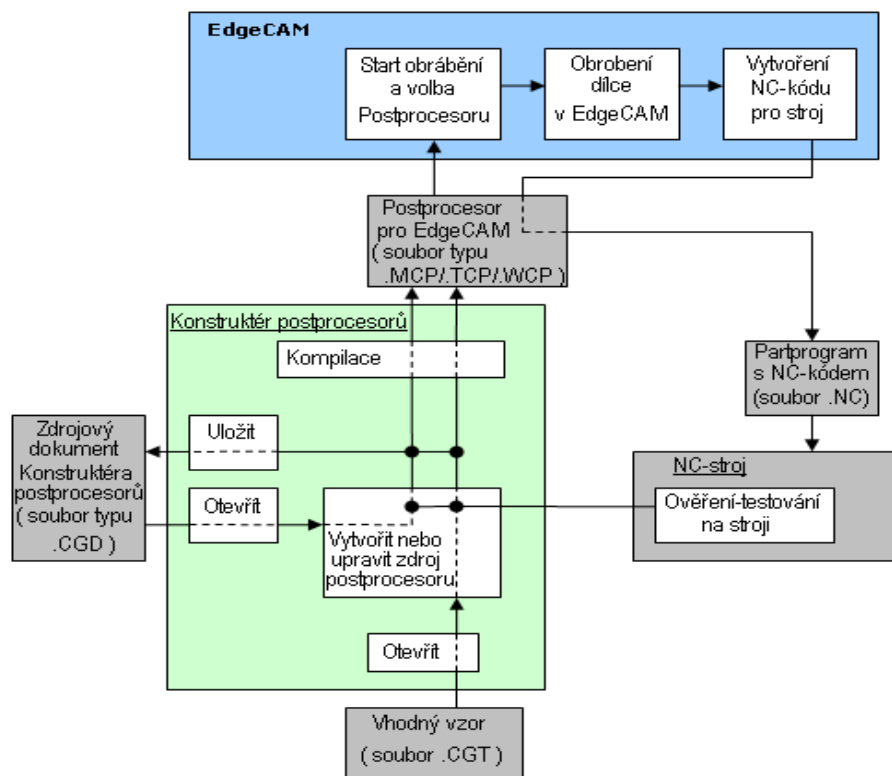
Je mnoho řídicích systémů, včetně jejich nejrůznějších variant. Požadavky na postprocessing tedy vycházejí vždy od konkrétně použitého stroje. Důležitá je možnost postprocesory uživatelsky upravovat, konfigurovat, aby se jejich práce mohla přizpůsobit různým místním mutacím a zvyklostem.

Průběh tvorby postprocesoru pomocí EdgeCAMu a jeho vazeb je znázorněn na následujícím obrázku.

Výběr postprocesoru „překladače“ pro daný řídicí systém CNC stroje, na kterém se zhotoví daný výrobek, se u některých CAM systémů provede ještě před samotnou tvorbou postupu obrábění (např. u EdgeCAM, MasterCAM, SolidCAM). V případě potřeby je možné tato nastavení změnit. U jiných CAM systémů se výběr provede těsně před generováním NC kódu (např. Esprit, PowerMill).

Výběr postprocesoru před tvorbou postupu obrábění má své výhody. CAM systém v tomto případě nabízí při tvorbě postupu jen ty instrukce, které podporuje zvolený postprocessor.

Výběr postprocesoru se v EdgeCAMu provede ihned po přechodu z design do technologie. Změna postprocesoru v průběhu tvorby obrábění je možná, ale jen omezeně. EdgeCAM pak nabízí jen příbuzné postprocesory. Obejít toto omezení lze při založení nového obráběcího postupu, do kterého se pak zkopírují již vytvořené instrukce (operace a cykly).



Obr. 48 Průběh vytvoření postprocesoru a jeho vazeb

Rozdělení postprocesorů

Rozdělení postprocesorů lze charakterizovat podle více kritérií.

- Podle počtu os - pro které se generuje současný pohyb nástroje:
 - jednoosé,
 - dvouosé,
 - trojosé, atd.
- podle počtu řídicích systémů, pro které se generuje NC program,
- podle typu generovaných NC dat (diskrétní a “splinové” postprocesory).

Další možné rozdělení postprocesorů:

- adaptivní,
- neadaptivní,
- parametrické,
- neparametrické.

Programátor CNC stroje by měl být seznámen i s řízením posunových jednotek. Nelze optimálně nastavit pohony posunových jednotek komplexně pro všechny tvarové dílce. Řídící systém umožňuje ovlivňovat chování pohonů díky uživatelskému nastavení. K tomu existuje celá řada technologických prostředků, např.:

- tolerance dodržení kontury,
- spline interpolace,
- kompresory,
- objíždění rohů,
- snižování kinematiky posuvů, apod.

Naskýtají se do jisté míry tři protichůdné požadavky – rychlost posuvu, přesnost kontury a kvalita povrchu. Programátor si musí být vědom, že se neustále pohybuje v pomyslném trojúhelníku těchto veličin.

3.8. Provádění měření na obráběcích strojích



Čas ke studiu: 15 minut



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat měření na obráběcích strojích

Pomocí měřících sond je možné provádět měření součástek přímo na obráběcím stroji. Metoda ručního nastavování nástrojů a obrobků a kontrola součásti je časově velmi náročná. Zavádění měřících sond přímo na obráběcí stroj přináší eliminaci času nastavování nástrojů a nákladných přípravků, ustavování obrobků a v neposlední řadě přesné kontroly prvního kusu. Systémy nastavování nástrojů ušetří až 90 % času [7], které obvykle zabíralo ruční seřízení. Další výhodou provádění takového měření umožňuje získávat informace o poškozených nástrojích.

Tato technologie byla vyvinuta s cílem pokrytí velkého rozsahu aplikací, avšak určité klíčové funkce jsou společné: nalezení nulového bodu obrobku, určení velikosti přídatku na

obrábění, zjištění skutečného rozměru obrobené plochy, nepřímá kontrola opotřebení nástroje, nebo rozměrová kontrola obrobené součástky.

Důvody pro zavádění měření přímo v technologickém cyklu jsou například:

- snížení zmetkovitosti způsobené chybami měření,
- zkrácení časů seřízení nástrojů a ustavení obrobků,
- snížení nákladů na upínací přípravky,
- snížení provozních nákladů na obsluhu stroje,
- detekce poškozených nástrojů,
- zvýšení bezpečnosti práce,
- zlepšení kontroly procesu.

Přesnost obrábění odvisí od přesností upnutí dílce. Jedním z parametrů je tedy přesné určení polohy dílce, kartézské i uhlové, vůči souřadnému systému stroje.

Při použití dotykových sond se opakovatelná přesnost najetí na polohu pohybuje řádově v jednotkách μm [7]. Naměřené hodnoty se zaznamenávají do tabulky a následně jsou zohledněny v průběhu obrábění jako transformace souřadnic ve vztahu k danému dílci. Umožňuje-li plocha stolu upnout více dílců najednou, lze takto popsat samostatně každý upnutý dílec.

Součástí standardu využití dotykové sondy se stalo měření základních rozměrů obrobeného dílce přímo na stroji s upozorněním na rozdíly od výkresových hodnot, případně s vytištěním pomocného protokolu měření. Podobným způsobem je monitorováno opotřebení, nebo zlomení nástrojů. Stav opotřebení nástroje (změna rozměrů) lze vykompenzovat v tabulkách nástrojů, s využitím pro další obrábění bez negativních vlivů na rozměrovou přesnost hotového dílce. Software pro tyto technologie je u moderních řídicích systémů (např. Heidenhain iTNC 530) již ve standardní výbavě [7].

Na jakosti obrobeného povrchu se ve velké míře podílí kromě technologického vybavení stroje také jeho stav a tuhost. Extrémní opotřebení prvků uložení vřetene, posuvového mechanismu, atd. mají za následek špatnou kvalitu obrobeného povrchu. Není-li stroj přesně seřízen a dobře udržován, mohou se vyskytnout vibrace, které zkracují trvanlivost břitu nástroje a způsobí špatnou jakost obrobeného povrchu.

3.9. Nové trendy vývoje v oblasti CAD/CAM systémů



Čas ke studiu: 20minut



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat nové trendy v oblasti CAD/CAM systémů a znát směr vývoje těchto softwarových produktů.

Není vzdálená budoucnost, kdy v CAD/CAM systému si nadefinujeme požadovanou drsnost a systém nám automaticky vygeneruje řezné podmínky (upravené optimalizací) pro konkrétní doporučený řezný nástroj. (U některých CAM systému již existuje funkce obrobení na požadovanou drsnost.) Poté bude takovýto simulovaný povrch možné zhodnotit a rozhodnout o případné další úpravě vstupujících parametrů do procesu řezání. CAD/CAM systém bude schopen vyhodnotit jakoukoliv problematickou část povrchu, kde například dochází k přerušovanému řezu, k různým přechodům ploch, ke vstupu, či výstupu nástroje z materiálu.

Od firem vyvíjející CAM software se požaduje, aby programy byly efektivnější a práce programátora pracujícího s tímto softwarem byla efektivnější. V oblasti CAM systémů lze očekávat dle následující trendy vývoje [20]:

- aplikace nejnovějších výsledků výzkumu z oblasti teorií technologie obrábění,
- tvorba modulů pro podporu výroby v dalších oblastech strojírenské výroby (např. hluboké tažení, svařování, montáž apod.),
- zavádění expertních systémů do oblasti počítačové podpory výroby, s cílem efektivnějšího využívání vyřešených úloh a problémů,
- vytváření databází hotových postprocesorů s možností jejich využití jako celku, nebo využití části postprocesoru na tvorbu dalších postprocesorů,
- přechod od CAD/CAM k prostředí CAPE (*Concurrent Art to Product Environment*), umožňující říditelným způsobem komplexně řešit všechny etapy realizace nového výrobku od virtuálního návrhu až po praktickou realizaci ve výrobě,

- využívání standardu STEP (*Standard for the Exchange of Product*) pro přebírání modelu specializovanými CAM systémy z CAD systémů.

V následujícím desetiletí lze očekávat průlom ve vývoji v oblasti optimalizace podmínek obrábění. Již nyní se vývojový pracovníci programující moduly CAM systémů snaží optimalizovat alespoň dráhy nástroje. Tato snaha se řadí do popředí jejich zájmů. Bohužel mnohdy ona zmiňovaná „optimalizace“ je bez optimalizace řezných podmínek.

V dnešní době firmy mění počítače každé čtyři roky. CAD CAM systém se udržuje obvykle každý rok na základě uživatelské podpory. Jen tak je možné dostatečně rychle reagovat na vývoj strojírenských technologií.

Úkony, instrukce a možnosti volby, jako jsou: možnost efektivně ovlivnit najetí a vyjetí břitu ze záběru, korekce správného odvodu třísek a zabraňování jejich hromadění volbou vhodných strategií, umožnění sklonu vřetene frézky – z důvodu zabránění tzv. dořezávání frézy, volba drah nástroje podle různých křivek a další, by měly patřit mezi běžně volené a používané úkony při vytváření obráběcího postupu v CAM systému.



Kontrolní otázky

Které nadstandardní úkony a vylepšení lze na moderních obráběcích strojích vykonávat?

Jaké jsou hlavní požadavky na CNC řídicí systémy?

Jaké je hlavní využití HSC technologie?

K čemu slouží optimalizační programy při obrábění?

Jaké jsou základní faktory pro výběr CAD/CAM systému?

Na jaké elementární pohyby se rozloží popis celkové dráhy nástroje?

Co je postprocessing?

Jaké jsou důvody zavádění měření přímo v technologickém cyklu?

4. Obrábění tvarových ploch

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

Budete umět:

- Popsat problematiku obrábění tvarových ploch

Budete umět

Budete schopni:

- Detailněji popsat 3-osé frézování tvarových ploch
- Detailněji popsat víceosé frézování tvarových ploch
- Popsat možnosti 5-osého frézování

Budete schopni

Jednou z běžných technologií současnosti je tzv. 3D - prostorové obrábění nepravidelných ploch. Proces řezání (třískového obrábění) zde může být řízen, vyžaduje-li to tvar obráběné součásti, simultánně (současně neboli plynule) ve třech osách - většinou X , Y a Z . Jedná se o technologicky jednoduché, ale i náročné plochy prostorově nepravidelných tvarů. Ovšem i zde je technologicky jakási hranice tohoto způsobu obrábění. Existuje řada ploch, které touto technologií obrábět nelze. Nad touto hranicí je nutné použít mnohem progresivnější a produktivnější technologii – technologii víceosého obrábění.

Jednou z předních progresivních technologií současnosti je zmiňovaná technologie víceosého obrábění nepravidelných ploch. Proces řezání (třískového obrábění) zde může být řízen, vyžaduje-li to tvar obráběné součásti, simultánně (současně neboli plynule) ve více osách (obvykle v pěti osách). Jedná se tedy o technologicky jednoduché, ale i velmi náročné „zborcené“ plochy prostorově nepravidelných tvarů, které jsou často matematicky obtížně definovatelné. Další z progresivních technologií, která řeší mnohé problémy „klasického (konvenčního) třískového obrábění“ uvažovaných ploch se nazývá HSC (High Speed Cutting – „vysokorychlostní řezání – „obrábění“). Smyslem této progresivní technologie je snížit cenu výrobku při nižší energetické náročnosti, nežádoucích ekologických dopadech, a to při současném zvýšení jeho kvality. Použití obou zmiňovaných technologií současně se ovšem nevylučují, spíše naopak.

4.1. 3-osé frézování tvarových ploch



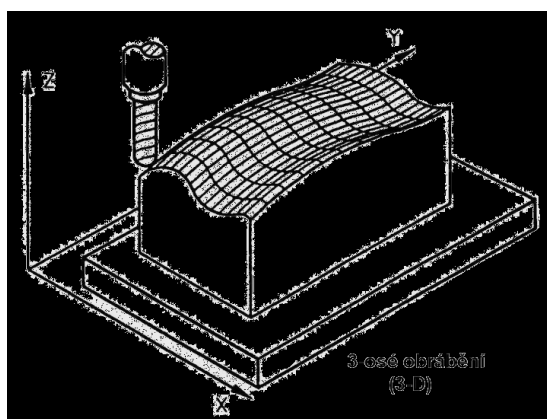
Čas ke studiu: 1,5 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

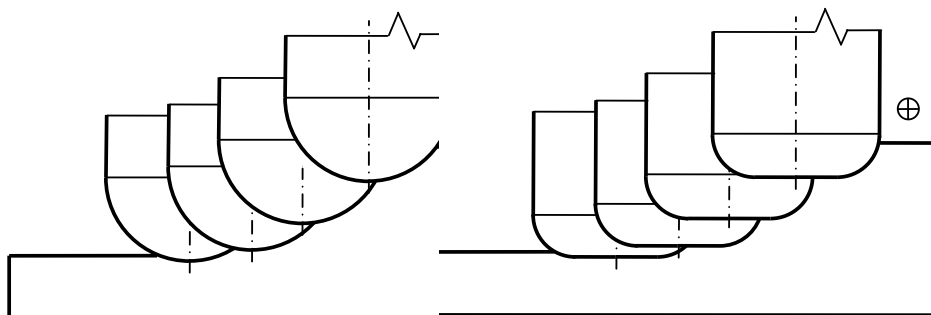
- definovat 3-osé frézování tvarových ploch
- popsat vyspělé technologie 3 osého frézování

Frézování 3 osé (nazývané také kopírovací frézování) je běžným způsobem CNC obrábění tvarových ploch. Nástroj se může pohybovat současně ve třech směrech. Tuto lze provádět na tzv. tříosých CNC obráběcích strojích – tříosých frézovacích centrech.

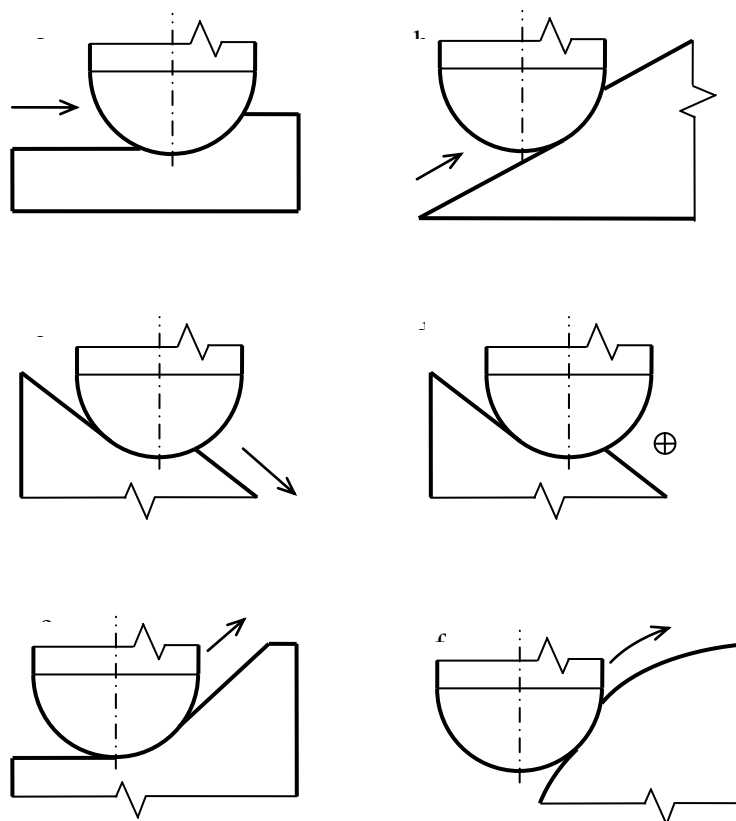


Obr. 49 Obrábění 3-osé [22]

Při obrábění tvarové plochy kulovou, nebo stopkovou frézou s rádiusem v rohu, dochází vlivem velikosti kroku přejezdů, rádiu nástroje a zakřivení povrchu, ke vzniku výstupků na obrobeném povrchu viz. následující obrázek [8].

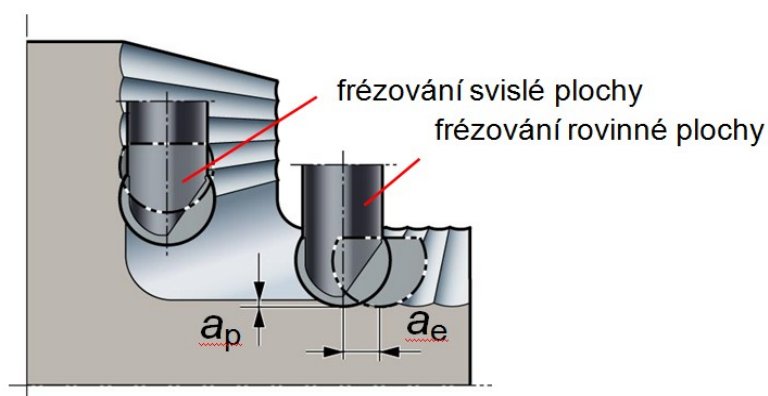


Obr. 50 Obrábění tvarové plochy kulovou frézou stopkovou frézou s rádiusem v rohu

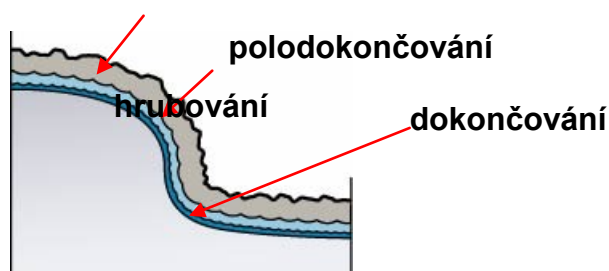


Obr. 51 Typické příklady obrábění tvaru kulovou frézou [2]

Dále je nutné se zmínit o typu kopírovacího frézování na svislé a rovinné ploše, kterou se nepodařilo obrobit jiným nástrojem a jinou strategií.



Obr. 52 Kopírovacího frézování na svislé a rovinné ploše



Obr. 53 Zajištění stálé tloušťky odebíraného materiálu [6]

Pro zajištění hladkého obrysu tvaru je nutné při hrubování, polohrubování a dokončování odebírat stále stejnou tloušťku materiálu.

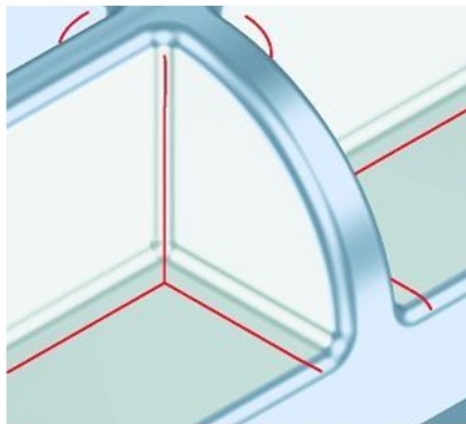
Vyspělé strategie 3 osého frézování

Použitím vhodných kombinací strategií obrábění lze dosáhnout snížení času obrábění, zvýšené životnosti nástroje a v neposlední řadě zlepšení kvality povrchu. Různé strategie mohou také ovlivnit rozměrovou přesnost obrábění. Je zřejmé, že zvolená strategie má velký vliv na výsledky obrábění, jakost obrobku a tedy také na ekonomické aspekty výroby [1].

Současné CAD/CAM systémy nabízí řadu funkcí a vylepšení, které přispívají ke zvyšování efektivnosti v obrábění. Největší pokrok je zaznamenán v oblastech, které jsou z hlediska současného požadavku uživatelů nejvíce preferované. Mezi tyto oblasti patří výroba forem, zápusťek a jiných tvarově složitých součástí v různých odvětvích strojího průmyslu. Vývojoví pracovníci programující moduly CAM systémů se snaží zjednodušit a ulehčit práci programátorů CNC strojů vytvářením softwarů s uživatelsky jednoduchou a intuitivní obsluhou. Snaha optimalizovat dráhy nástroje se řadí do popředí jejich zájmů. Následně uvádím výčet novinek a vylepšení vlastností CAM systémů. Zaměřím se převážně na v oblasti 3D frézování. Jednotlivé body výčtu různých strategií a vylepšení ukazují trend a směr rychlého vývoje těchto systémů. Mezi tento směr patří například:

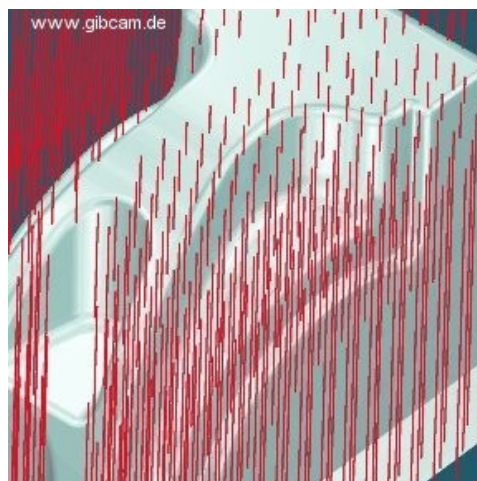
- Obrábění zbytkového materiálu
 - tato volba strategie u dnešních CAM systémů je velice obsáhlá a problematická, proto je jí věnována větší pozornost v následující kapitole
- Volba pro odstranění zbytku materiálu na dně (např. zápusťky) po hrubovacím obrábění konstantním krokem.
- Funkce dokončování rovného povrchu

- automaticky určuje rovné plochy na modelu a generuje dráhy nástroje, které odstraní jakékoliv nerovnosti zůstávající po předchozí dokončovací operaci.
- Spirálové obrábění
 - dráha nástroje je definována ve 2D podle různých spirálních vzorů a následně promítnuta na 3D model.
- Tužkové obrábění
 - funkce zajišťující doobrobení (dobírání) koutů a dokončování rádiusů.



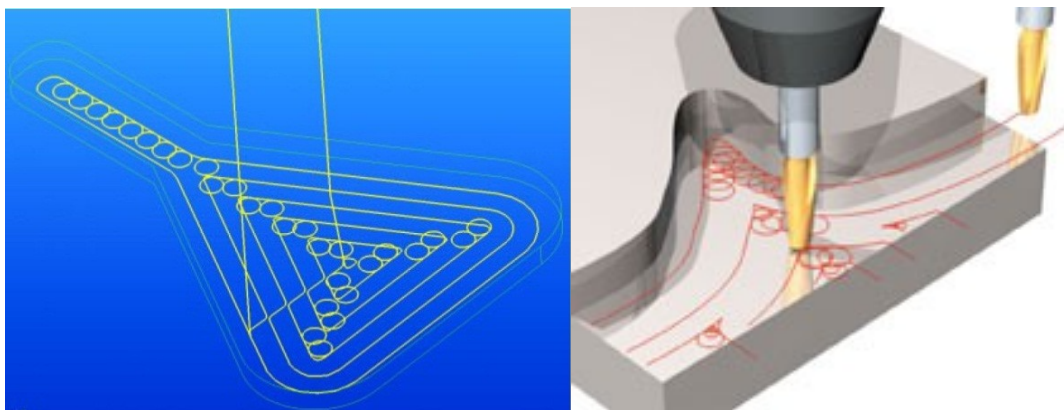
Obr. 54 Tužkové obrábění

- Rychlostní obrábění
 - funkce, která automaticky zaobluje dráhu nástroje pro dosažení vysoké konstantní rychlosti a eliminaci rázů při náhlých změnách směru. Využívá „S“ křivek pro přejezdy mezi dráhami a dokáže použít trochoidální pohyb nástroje pro obrábění dutin. Dále při nutném obrábění celým průměrem nástroje mohou být uplatněny pomocné – doplňkové vrstvy a tím bude zajištěn konstantní objemový úběr materiálu.
- BORE JET - „vrtací hrubování“
 - metoda velmi efektivní hrubovací strategie frézování, používána pro úběr velkého objemu materiálu. Obrábění se provádí zapichováním při využití vhodného nástroje, kde nástroj vykonává sérii vrtacích pohybů v pravidelně uspořádané síti bodů. Tato specifická funkce vyžaduje speciální nástroje. Je velmi produktivní metodou.



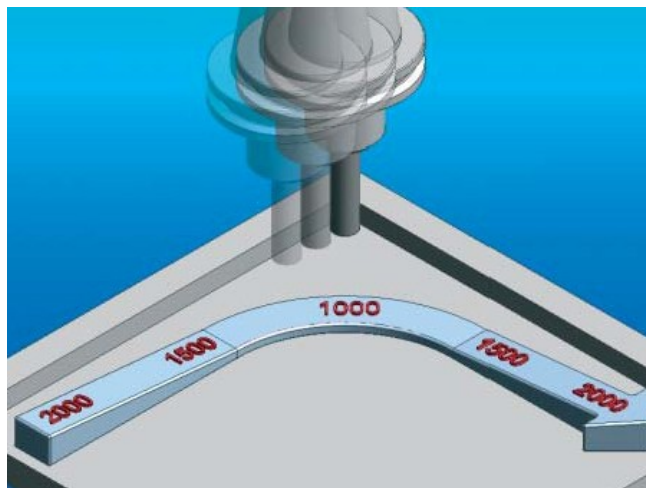
Obr. 55 Strategie BORE JET

- Optimalizace „Z“ konstant bez rovných ploch
 - pokud byly rovné plochy obrobena již dříve, je možné u této strategie rovné plochy vynechat, hospodárnost obrábění se pak významně zvýší.
- Obrábění křivek
 - funkce umožňující různé strategie obrábění 2D a 3D křivek, včetně obrábění zbytkového materiálu křivky, obrábění v konstantní hloubce, nebo obrábění, kdy se nástroj ke křivce inkrementálně přibližuje.
- Trochoidní frézovací cyklus
 - funkce vloží do operace hrubování trochoidní pohyb, ale pouze do oblastí, kde je to možné s ohledem na zvolený minimální rádius. Trochoidní frézování přináší celou řadu výhod. Minimalizací změn směru obrábění, umožňuje použití vysokých konstantních řezných rychlostí, které podstatně přispívají ke zkrácení obráběcího času. Dále pak trochoidní frézovací cyklus zlepšuje řezné podmínky tím, že nástroj je stále v kontaktu s obráběným materiálem. Další výhodou je prodloužení životnosti nástroje. Funkce zamezí obrábění plným průměrem frézy (např. při prvním hrubovacím řezu, kdy nástroj obrábí v drážce).



Obr. 56 Trochoidní dráha nástroje

- Obrábění na čisto podél hranice 3D vodících křivek
 - dobrá kombinace vodících křivek podle členitosti geometrie vede ke efektivním výsledkům frézování. Tato strategie dává velké možnosti obrábění tvarově složitých dílů, u kterých je kladen důraz na kvalitu povrchu.
- Zkracování přejezdů a správa rychloposuvů
 - funkce sloužící ke zkracování přejezdů rychloposuvem, kde se optimalizací trajektorií docílí zkrácení strojního času. Uživatel může přizpůsobit nejkratší dráhy nástroje při přejezdech rychloposuvem.
- Kontrola kolize držáku nástroje
 - funkce provádějící výpočet nezbytné minimální délky držáku nástroje s možností rozdělení dráhy na část bez kolize a část s kolizí (úsek, který je nutno obrobit jinou kombinací upínání, nebo pomocí vyklopení nástroje). Pro naprogramování obrábění s vyklopeným nástrojem se využije spočtený úsek drah držáku nástroje, který probíhal v kolizi.
- Proměnlivý posuv
 - umožňuje změnu posuvu na kterékoliv části dráhy nástroje pomocí vytyčovacích značek. Použitím adaptivního proměnlivého posuvu (např. v rozích součástí) se dosáhne efektivnějšího procesu obrábění spolu se zvýšením přesnosti.

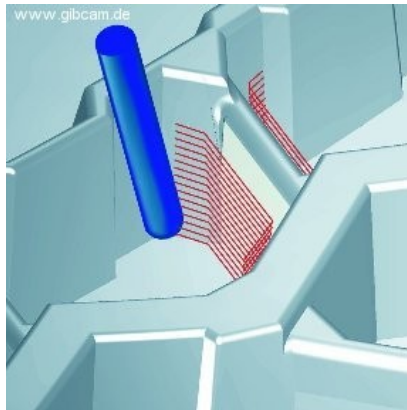


Obr. 57 Proměnlivý posuv při obrábění

- Nastavení přesnosti u obrábění rovinných ploch
 - umožňuje zadat programu velikost sklonu plochy, která má být brána jako vodorovná a tím také obráběna jinou strategií, než plocha zešikmená.
- Porovnání obrobené součásti s modelem
 - možnost barevného a číselného zobrazení velikosti rozdílu obrobené součásti (např. po hrubování, nebo dokončování) a modelu součásti. Možnost provádění řezů na obrobeném tvaru a odměřování.
- Zadávání drah nástroje podél jakýchkoliv (synchronizačních) křivek.
- Speciální funkce frézování sražení
 - vytvoří dráhy nástroje pro sražení ostrých hran. To je provedeno v závěrečné fázi po kompletním obrobení.
- Obrábění na konstantní drsnost
 - možnost provádět obrábění na konstantní drsnost při různých strategiích. Lze definovat různé drsnosti, podle potřeby technologa, na různých částech modelu.
- Dodatečné editování řezné dráhy
 - možná editace obecných parametrů až po jednotlivé body řezné dráhy. Zvládnutí editace jednotlivých bodů dráhy nástroje umí jen některé CAM systémy, mezi nich patří například Mastercam a SurfCAM.

- Bezobslužný výpočet obrábění v nočních hodinách
 - lze plánovat pro složitá obrábění s malým úběrem a krokem, kdy si systém otevře soubor, provede výpočet, zavře soubor, otevře další soubor atd..
- Použití drah nástrojů jako geometrii
 - použití části dráhy nástroje jako hraniční geometrie pro obrábění, nebo pro konstrukci jiné geometrie. Jednoduše se vybere dráha nástroje převede se do 3D geometrie. S touto geometrií se již pracuje v CAD modulu bez problémů. Takto lze např. připravit a optimalizovat dráhy nástroje a tím minimalizovat ztrátové časy.
- Funkce SRM (step reduction milling)
 - funkce zajišťující efektivní obrábění kontury po „z“ kroku, který je mezikrokem předchozího obrábění. Tzn. nástroj provádí obrábění tvaru v „z“ krocích s vyhlazováním po předchozím obráběním o poloviční krok.
- Automatický výběr nástrojů
 - funkce zajišťující automatický výběr nástroje pro obrobení součástky. Funkce je schopna analyzovat 3D kapsu a navrhnout sadu nástrojů z databáze, která povede k nejefektivnějšímu obrobení.
- Tvorba vlastních maker
 - funkce umožňující tvoření vlastních nájezdových, přejezdových a odjezdových maker. Nejčastěji se používají makra předdefinovaná, ale ve speciálních případech lze pomocí grafického menu vytvářet makra vlastní.
- Koncentrická strategie hrubovacího cyklu
 - funkce zamezující vjezdu nástroje celým průměrem do plného materiálu, je dodržován stálý průřez třísky. Sousedné či nesousedné frézování je vždy dodrženo.
- Přiřazení různým oblastem rozdílné přídavky na obrábění
 - různým oblastem lze přiřadit rozdílné přídavky. Velikost přídavku je vždy měřena kolmo k povrchu, v překrývajících se oblastech platí vždy větší z přídavek.

- Funkce zajišťující automatické generování příjezdu nástroje k obrobku bez vzniku podřezání při pětiosém obrábění.



Obr. 58 Generování příjezdu nástroje k obrobku

Při práci v CAD/CAM systému je nutné zohledňovat konkrétní obráběcí stroj a jeho řídicím systémem a následně pak konkrétní „na míru ušitý“ postprocesor. Moderní řídicí systémy umožňují použít pro jeden nástroj několik řezných hran. Uživatel si může zvolit, pro který bod bude NC dráha generována. Tuto možnost lze využít u tvarově složitých nástrojů, které se při vytváření dráhy nahradí nástrojem jednoduchým. Poslední verze řídicích systémů umožňují tzv. korekci na kouli, pomocí které je možno korigovat opotřebení, nebo přebroušení nástroje bez předešlého vygenerování nového programu pro nové zaoblení na konci nástroje. Pro správné použití „korekce na kouli“ je třeba vygenerovat nejen souřadnice koncového bodu nástroje, ale i souřadnice kontaktního bodu normály plochy a středu koule nástroje [2]. Tyto informace využívá řídicí systém pro korigování nástroje.

4.2. Víceosé frézování tvarových ploch



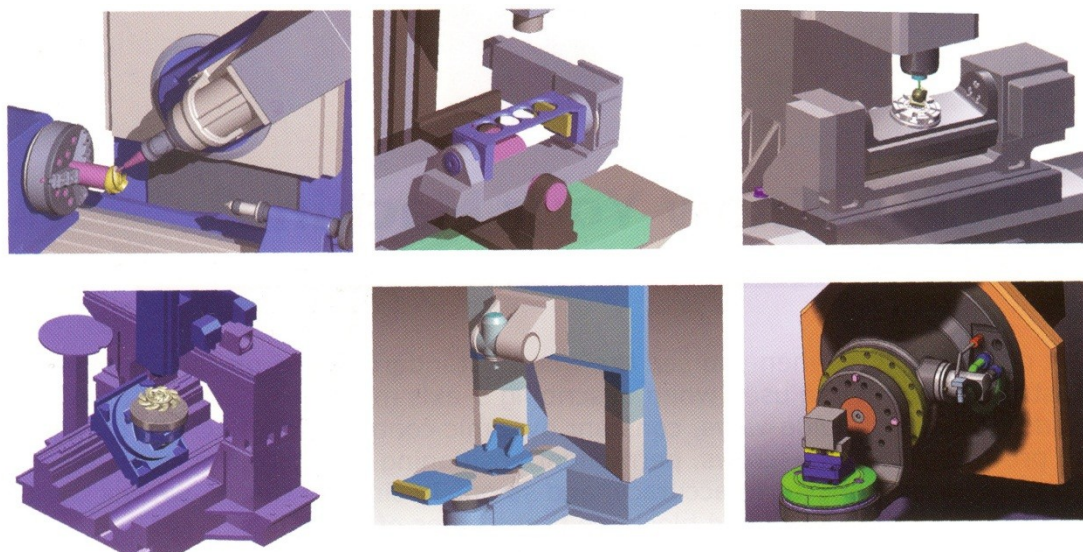
Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

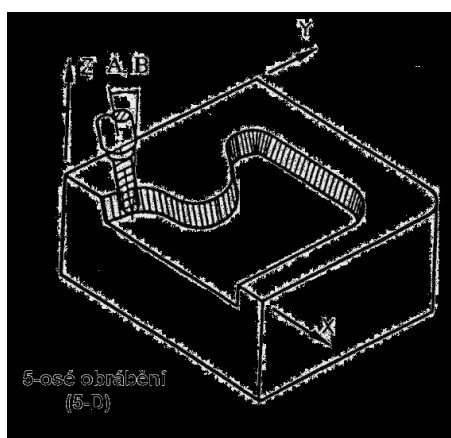
- definovat víceosé frézování tvarových ploch
- popsat kinematiku víceosých obráběcích strojů

Frézování víceosé zahrnuje technologii frézování s použitím více jak tří os. V obecném podvědomí známé jako obrábění více jak 3 osách současně, avšak pro definici víceosého obrábění současný pohyb ve zmiňovaných osách není podmínkou [1]. Nejběžněji označovanou touto technologií je 5 osé frézování, ale může být jím také frézování 4 osé. Tuto lze provádět na tzv. víceosých CNC obráběcích strojích – víceosých frézovacích centrech. Existují také případy víceosého obrábění s použitím 9 os a byly dokonce sestaveny obráběcí stroje s více jak 100 osami [1].



Obr. 59 Příklady typického uspořádání víceosých obráběcích strojů [1]

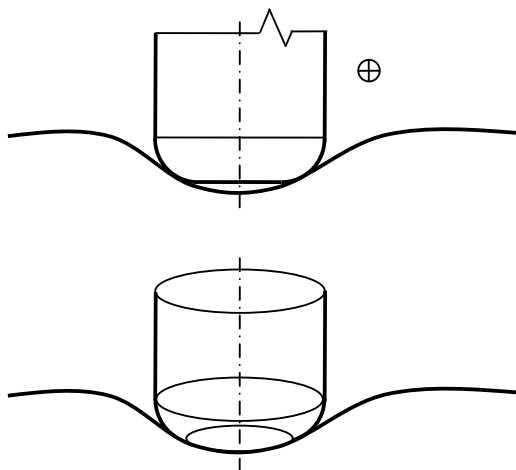
5 osé frézování je velice progresivní technologie CNC obrábění tvarových ploch. Při 5 osém plynulém obrábění se nástroj může pohybovat současně v pěti osách. Je možné obrábět plochu s jakoukoli orientací. To lze realizovat plynulým natáčením vřeteníku, natáčením obrobku, nebo rozdělením natáčení mezi vřeteník a obrobek.



Obr. 60 Obrábění 5-osé [22]

Aplikací pětiosého obrábění, lze docílit obrobení takových částí zakřiveného povrchu, které nemohlo být obrobeno klasickou metodou tříosého obrábění. Jsou to zejména tvarově složité drážky, kapsy a tvary, které jsou v tzv. podkosu. To je možné bez nutnosti měnit upnutí obrobku v obráběcím stroji, nebo měnit nulový bod obrábění. Osa nástroje se plynule mění tak, aby vždy dosáhla obrobení celého tvaru při zachování požadované kvality povrchu. Také díky vyklonění nástroje lze zkrátit jeho vyložení, což vede k lepší kvalitě povrchu a prodloužení životnosti nástroje.

Aplikací pětiosého obrábění, lze docílit efektivní obrobení zakřiveného povrchu (technologíí 3 osého obrábění toto nelze), při využití efektivního rádiusu nástroje viz. 5-osé obrábění zakřiveného povrchu stopkovou frézou s rádiusem v rohu. Touto metodou vzniká lepší drsnost povrchu, docílí se zvýšení přesnosti a v neposlední řadě se zkracuje celkový čas obrábění.



Obr. 61 5-osé obrábění zakřiveného povrchu stopkovou frézou s rádiusem v rohu

Pětiosé obrábění umožňuje pro nejvhodnější obrábění stopkovou frézou s rádiusem v rohu kontinuálně regulovat naklápění nástroje s respektováním obráběného povrchu. Krok nástroje je generován pro specifickou výšku výstupků (drsnoty ve směru kolmém na posuv) s ohledem na co nejnížší hustotu těchto kroků. Standardní procedury pro tříosé obrábění jsou pak nahrazovány mnohem dokonalejšími speciálními programy pro pětiosé obrábění, které dosahují vysoké kvality povrchu, použitím nejvhodnějšího směru řádkování a vysoké produktivity použitím nejvhodnějšího prostorového sklonu osy nástroje pro daný sklon obráběného povrchu.

Z hlediska kinematiky je možné úhlové osy A a B možné realizovat buď natáčením vřeteníku, nebo natáčením obrobku, anebo rozdělením kinematiky mezi nástrojový a obrobkový systém. Realizace dvouosého natáčení vřeteníku je účelná hlavně u strojů s velmi rozměrnými, nebo protáhlými obrobky, jejichž umístění na otočném a sklopném stole není dost dobře reálné. Pro HSC aplikace (vysokorychlostní a vysokoposuvové) je žádoucí naklápět integrované vřeteno jako celek, nikoli přivádět pohyb k vřetenu přes naklápěcí kuželové převody. Gyroskopické efekty HSC vřeten a požadavky rychlého odstraňování třísek spíše hovoří pro dvouosé natáčení obrobku upnutého na otočném stole. Velmi je také rozšířena koncepce otočného stolu uloženého ve sklopné „kolébce“, která je využitelná v kombinaci s vertikálním i horizontálním vřetenem [25].

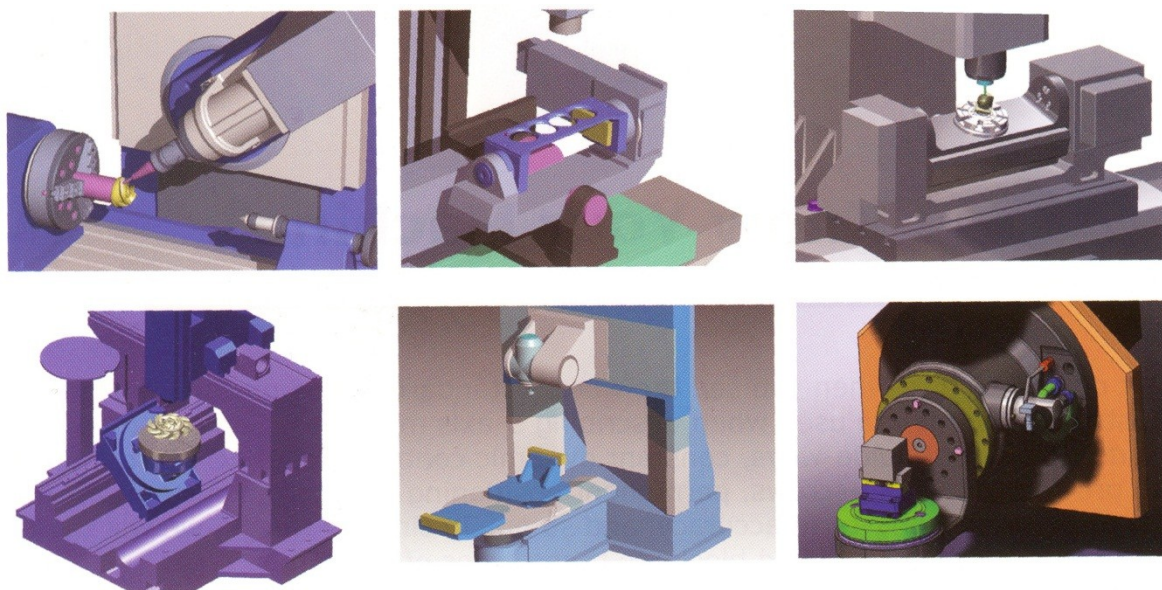
Kinematikou víceosých strojů se rozumí definice pohybu jednotlivých částí obráběcího stroje. Lineární pohyby se realizují podle os X, Y, Z. U víceosého obrábění se k těmto osám přidávají pohyby rotačních os A, B, C. Podle kinematiky stroje získáváme v NC programu kromě lineárních os X, Y, Z ještě rotační osy A, B, C. Zápis 5osé dráhy do NC programu vypadá následovně [25]:

55 L X-17.838 Y-3.196 Z-2.810 B-15.098 C-58.923

Podle toho, která část stroje se pohybuje v rotačních osách, rozeznáváme různé koncepce obráběcích strojů.

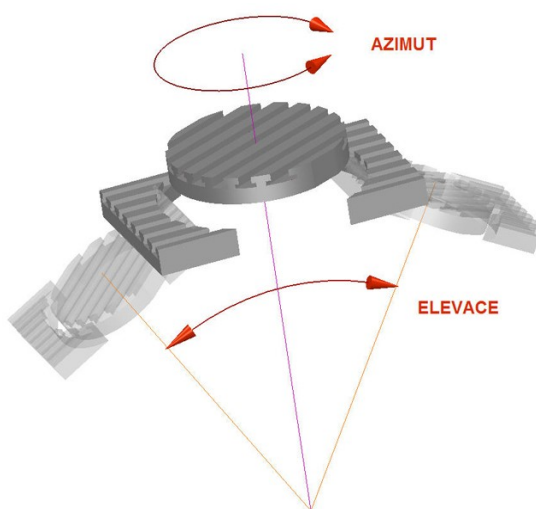
Základní rozdělení konstrukce víceosých obráběcích strojů z hlediska rozdělení pohybu mezi obrobkem-stolem a vřetenem-nástrojem:

- stůl-stůl (Víceosé stroje vyvozují rotační pohyby dvojitým otočným stolem. Primární otočný stůl nese sekundární.),
- hlava-stůl (Víceosé stroje vyvozují rotační pohyby stolem, který nese obrobek a vřeteníkem s naklápějícím nástrojem.),
- hlava-hlava (dochází k pohybu obráběcí hlavy stroje (vřetene) - jak v úhlu azimutu, tak elevaci. Obrobek je stacionární).



Obr. 62 Příklady typického uspořádání víceosých obráběcích strojů [1]

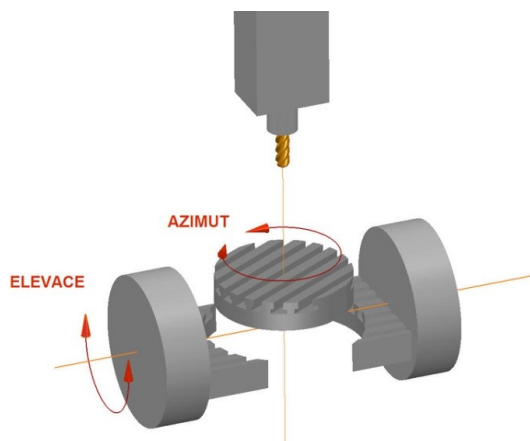
U koncepce strojů **stůl-stůl** jsou rotační pohyby azimutu i elevace zajištěny rotačně sklopným stolem obráběcího stroje. Osa elevace může být umístěna buď vertikálně, anebo i pod úhlem. Zpravidla to bývá úhel 45 stupňů. Výhodou koncepce stůl-stůl je kromě tuhosti také snadný odjezd od obrobku v jakékoliv fázi obrábění, jelikož pohyb v ose Z je realizován vřetenem, které má vždy pouze vertikální směr. Víceosé obráběcí stroje stůl-stůl mohou být vertikální, nebo horizontální. Mezi typické představitele této koncepce patří např. DMG, Huron [25].



Obr. 63 Kinematika víceosých obráběcích strojů stůl- stůl [25]

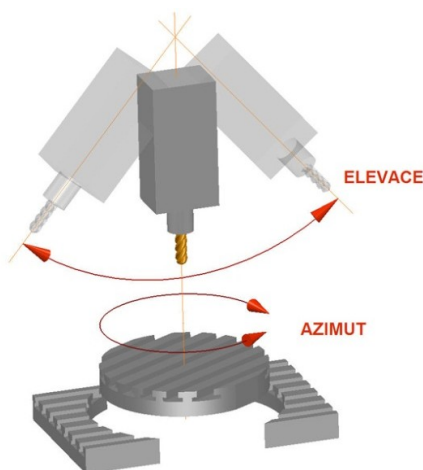
Je možné se také setkat s konfigurací velmi podobnou ke konfiguraci stůl-stůl, tím je stůl-stůl-kolébka. Rozdíl je pouze v uchycení stolu obráběcího stroje, které je realizováno na obou

koncích stolu, většinou orientovaného podle osy X. Mezi typické představitele této koncepce patří např. Kovosvit MAS, Hermle, Mazak, Quasar [25].

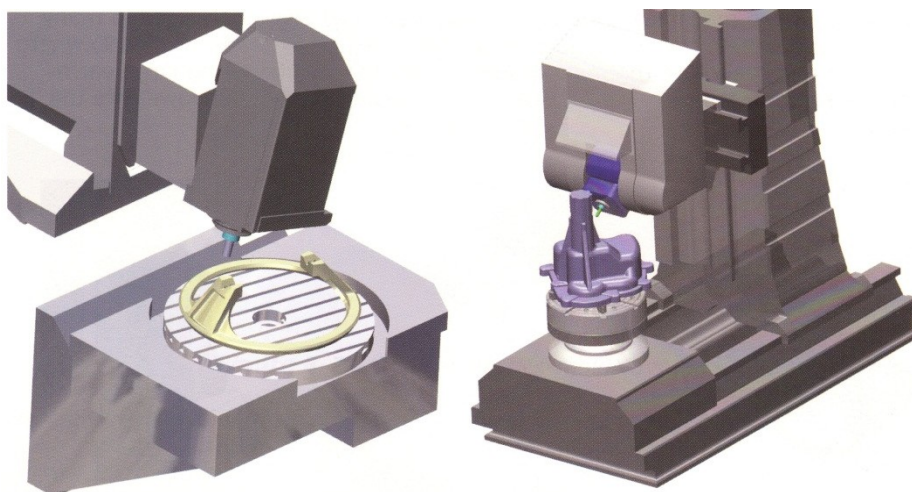


Obr. 64 Kinematika víceosých obráběcích strojů stůl- stůl- kolébka [25]

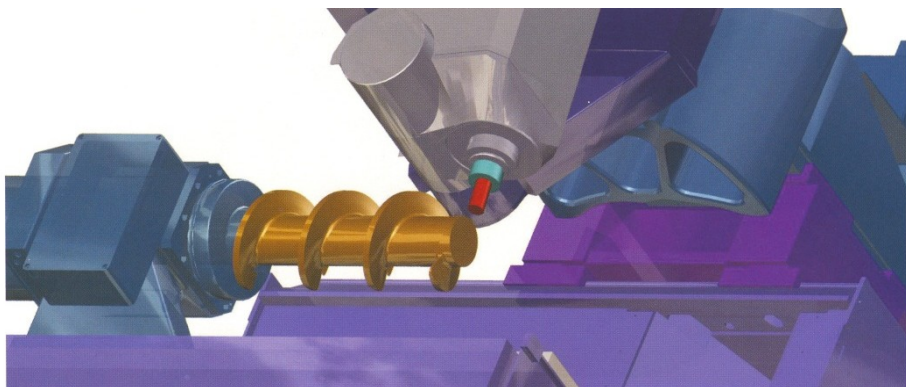
Koncepce strojů **hlava-stůl** rozděluje rotační pohyby mezi hlavu a stůl obráběcího stroje. Hlava vykonává rotaci podle úhlu elevace. Rotaci v azimutu zajišťuje rotační stůl. Tato koncepce je tužší než konfigurace hlava-hlava. Kromě větší tuhosti je také možné využít neomezených limitů úhlu elevace rotačního stolu. Tato konfigurace je vhodná jak pro různé případy obrábění součástí pro letecký a automobilový průmysl, které nejsou dlouhé. Při upnutí do sklíčidla s podporou koníku je vhodná také pro obrábění velmi dlouhých rotačních částí, např. obrábění šneku pro vstřikovací lisy. Mezi typické představitele této koncepce patří DMG, Roeders [25].



Obr. 65 Kinematika víceosých obráběcích strojů hlava - stůl [25]

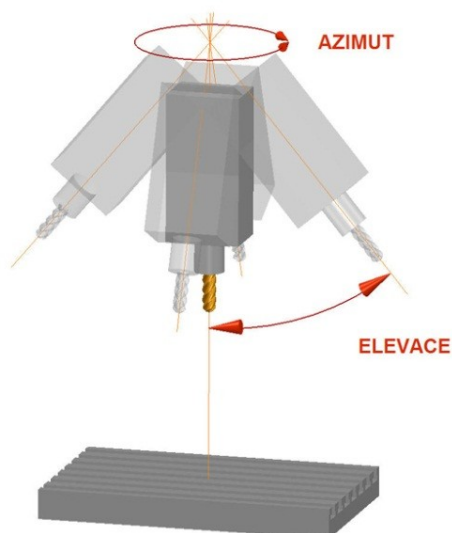


Obr. 66 Příklad obrábění součástí pro letecký a automobilový průmysl s konfigurací hlava – stůl [1]



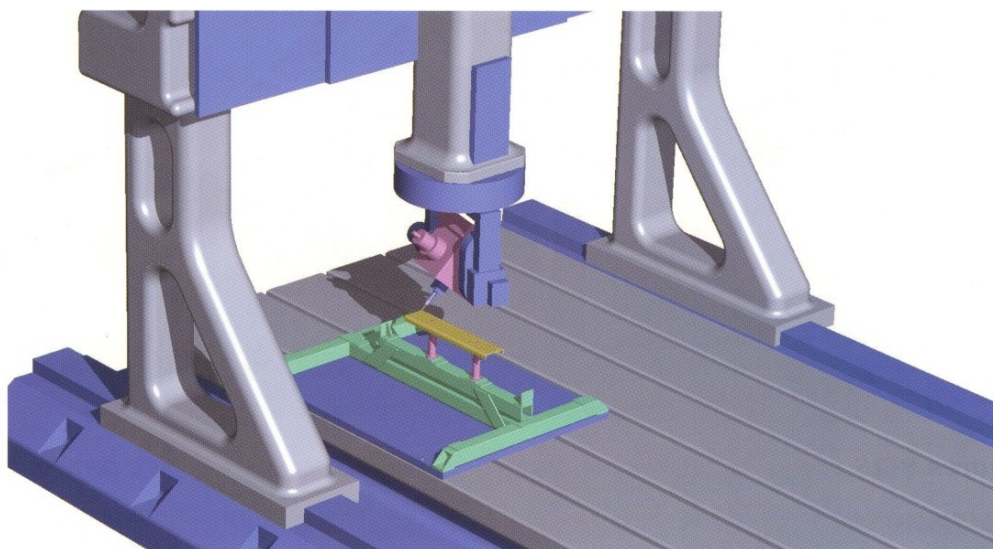
Obr. 67 Příklad obrábění dlouhých součástí částí (šnek pro vstřikovací lisy) s konfigurací hlava - stůl

Realizace dvouosého natáčení vřeteníku (konfigurace **hlava-hlava**) je účelná hlavně u strojů s velmi rozměrnými, nebo protáhlými obrobky, jejichž umístění na otočném a sklopném stole není reálné. Tato koncepce se často používá u portálových a obráběcích strojů s velkými pojezdy. Nevýhodou bývá menší tuhost obráběcí hlavy a také limitace úhlu azimutu, kdy u některých strojů není možné obrábění po spirále, díky limitaci úhlu azimutu pouze na hodnoty kolem 360 stupňů. Mezi typické představitele této koncepce patří např. TOS Kuřim, Rambaudi, Fidia, CMS [25].



Obr. 68 Kinematika víceosých obráběcích strojů hlava- hlava [25]

Velmi rozšířenou koncepcí hlava-hlava jsou také portálové víceosé obráběcí stroje hlava-hlava. Tyto stroje jsou vhodné pro obrábění dlouhých součástí (v leteckém, ropném a dřevařském průmyslu). Záměnou frézovacího nástroje za hlavu laseru, plazmy, nebo hlavy pro řezání vodním paprskem vznikne širší záběr těchto strojů. Tuhost a přesnost nejsou jejich silnou stránkou, avšak to je vyváženo její velkým rozsahem schopností. Ukázka této koncepce je na následujícím obrázku.



Obr. 69 Obrábění součástí na portálovém hlava-hlava obráběcím stroji, kombinace abrazivní vodní paprsek/frézování [1]

Základní výhody 5-osého obrábění:

- snížení času výroby,
- možnost komplexního obrobení dílu,
- možnost opracování dílců mnohem efektivněji, na menší počet upnutí obrobků – snížení možnosti chyby při seřizování – zvýšení přesnosti,
- možnost použití kratších nástrojů pro docílení produktivnějšího obrábění a zvýšení trvanlivosti nástrojů,
- zlepšení funkčních vlastností obrobeného povrchu (parametrů drsnosti povrchu, mikrotvrdosti, zpevnění povrchové vrstvy, atd.) díky obrábění mimo osový střed nástroje,
- zvýšení přesnosti výroby,
- možnost využití vyšších řezných a posuvových rychlostí.

Při využití 5-osého **plynulého** obrábění lze zmiňované výhody dále doplnit o:

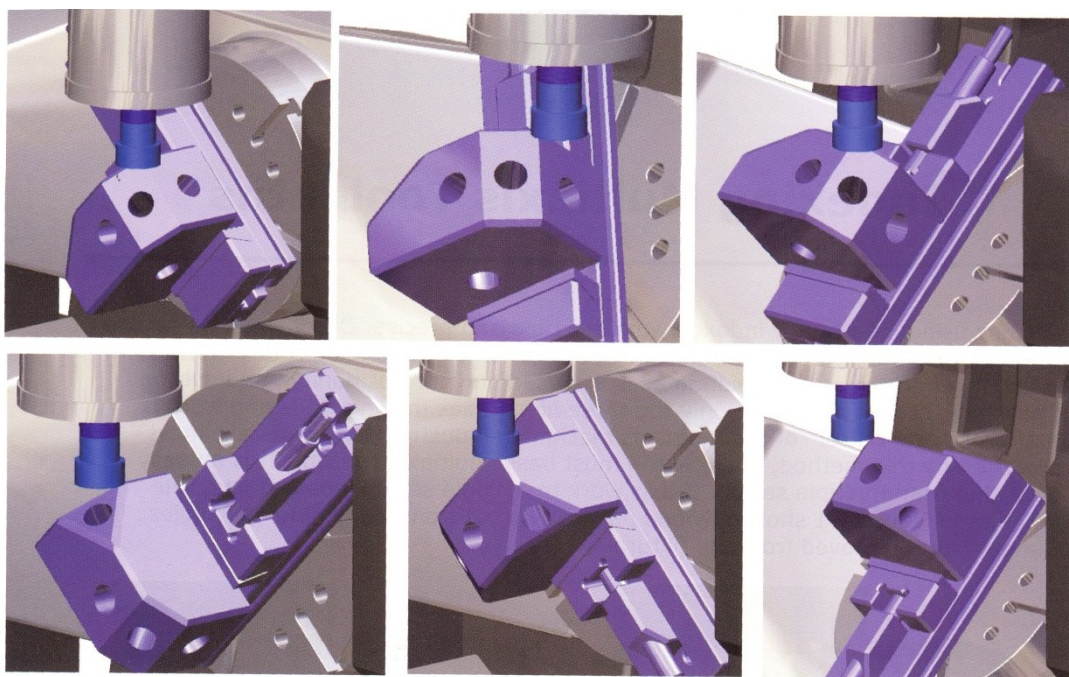
- možnost obrobení velmi komplikovaných tvarů,
- odstranění v procesu výroby nekonvenční technologie,
- možnost naklonění nástroje pro předcházení kolizí mezi nástrojem, držákem nástroje a obrobkem,
- možnost naklonění nástroje pro docílení lepšího přístupu k obráběné ploše (markantní zejména pro obrábění hlubokých částí forem a zápustek),
- možnost tvorby konstantního průřezu třísky,
- použití mnohem efektivnějších strategií obrábění v porovnání s 3 osým obráběním.

Nevýhodou použití 5 osého plynulého obrábění lze shrnout do těchto bodů:

- vyšší pořizovací náklady (cena obráběcího centra, vybavení stroje, CAD/CAM systém, postprocesor, atd.)
- vyšší nároky na programátora a obsluhu stroje,
- problematická vizualizace a větší možnost kolizí,
- vyšší náklady na opravu stroje a jeho příslušenství při možné kolizi.

Je důležité se zmínit o tzv. indexování. Je mnoho různých typů obráběcích center, které mohou současně obrábět např. ve třech osách a v dalších dvou osách dochází jen k polohování součásti mimo samotný řez. Příklad označování takového obrábění je 3+2. Při 3 osém frézování používá obráběcí stroj tři lineární osy. Při pětiosém polohovém obrábění jsou přidány další dvě rotační osy. Obrábění 3+2 odkazuje na tři lineární osy, které jsou ovládány současně a dvě osy rotační, pomocí kterých se hlava může přesunout na novou pozici a pak obrábět. Poté, co je hlava v nové pozici, provádí se klasické 3 osé obrábění. Tento typ obrábění může pohybovat pouze lineární osou nebo osou rotační (nelze tedy provádět oba pohyby zároveň).

Mnoho součástí je vyráběno touto metodou, tzv. indexování, avšak pro typ výroby, jako je výroba forem a zápuštěk, není tato metoda zdaleka tak efektivní. Tato metoda je výhodná pro hrubovací fáze výrobního postupu. Pro dosažení větší tuhosti je doporučováno při hrubování zablokovat rotační osy. Dvě rotační osy jsou nejprve nastaveny do požadovaných poloh a následně zablokovány, pak tedy dochází ke klasickému 3 osému obrábění. Zablockováním rotačních os lze dosáhnout vyšší tuhosti než při simultánním obrábění. Proto metoda indexování při hrubování je považována za přesnější, než simultánní obrábění ve více osách.



Obr. 70 Příklad obrábění dílu s různých úhlů bez nutnosti přepínání při tzv. indexování

[1]



Kontrolní otázka

Co je smyslem HSC obrábění?

K čemu dochází při obrábění tvarové plochy kulovou nebo stopkovou frézou?

Co je myšleno pojmem tužkové obrábění?

Čím je výhodnější 5-osé obrábění oproti 3-osému?

Jaké jsou základní výhody 5-osého obrábění?

5. Strategie frézování při obrábění naklopeným nástrojem

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

Budete umět:

- Popsat problematiku obrábění naklopeným nástrojem

Budete umět

Budete schopni:

- Vypočítat efektivní řezné parametry

Budete schopni

Tato kapitola popisuje možnost zvyšování efektivnosti obrábění s využitím CAD/CAM systémů, díky nimž lze cíleně řídit náklon nástroje pro dosažení lepší jakosti povrchu.

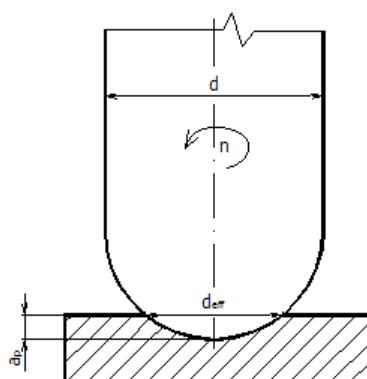
Při frézování kulovými frézami standardním způsobem, kdy materiál a nástroj svírají pravý úhel, je na kulovém ostří v ose frézy nulová řezná rychlost. V tomto místě nástroj pouze zatlačuje materiál obrobku. Díky tomu zde dochází k nežádoucím vlivům, jako je přechování třísky, zvyšování teploty řezání, nebo zvýšená tvorba nárůstku. Tyto jevy mají za následek zhoršení jakosti povrchu obráběného materiálu a snížení trvanlivosti nástroje, v nejhorším případě jeho vyštípnutí. Zmíněné jevy lze eliminovat naklopením nástroje, nebo nakloněním obrobku.

Sklon osy nástroje oproti normále k povrchu ve směru posuvu zapříčiní vznik mírného normálového napětí. Případný boční příklon nástroje k dosud neobrobenému povrchu (použitý u experimentů) při strategii řádkování přináší útlum samobuzených kmitů a zvýšení produktivity obrábění až na 300% původních hodnot [22]. Sklon nástroje má tedy stabilizující účinky díky efektivnímu tlumení samobuzeného kmitání svojí příznivou směrovou orientací, při které v nástroji převládají tahové síly a při které má náhodné zvýšení síly řezání za následek odklon nástroje od obráběného materiálu. Vliv sklonu nástroje je zde rozhodující, neboť je v něm při malém poloměru soustředěna téměř veškerá prostorová poddajnost řetězce „toku síly“ od nástroje k obrobku [21].

Úhel naklopení nástroje od normály k povrchu obrobku se používá v rozmezí 10 až 30 °. Jaký je nejvýhodnější úhel naklopení nástroje nelze s určitostí říci. Literatura [21]. uvádí, že

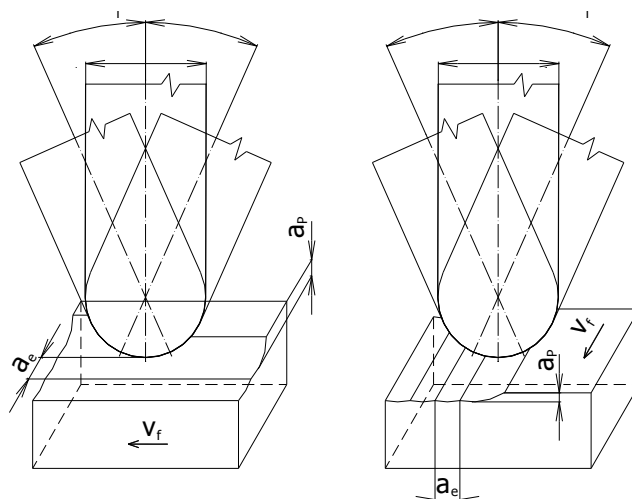
nejvhodnější úhel naklopení nástroje bývá okolo 15° . Literatura [6]. uvádí náklon okolo 20° . Výsledky experimentálních prací autora (např. v literatuře [12][13] a [14]) ukazují rozptyly hodnot náklonu nástroje v závislosti na použitých typech fréz (průměr, geometrie), materiálu obrobku, řezných podmínkách a obráběcím stroji.

Obr. 70 znázorňuje polohu nástroje tříosého obráběcího centra, u něhož není možnost naklonění vřetene (úhel $\beta_{n(f)} = 0^\circ$). Zde se podstatně snižuje efektivní průměr frézy d_{eff} , zvláště při malých hloubkách řezu a_p , a tím také efektivní řezná rychlost.



Obr. 71 Efektivní průměr frézy bez náklonu

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny možnosti naklopení nástroje vůči normále k povrchu.



a) naklopení ve směru posuvu

b) naklopení ve směru kolmém na posuv

Obr. 72 Možnosti frézování naklopeným nástrojem (a) naklopení ve směru posuvu, b) naklopení kolmé na směr posuvu

Efektivní průměr kopírovací frézy při frézování bez naklopení nástroje se vypočte dle vztahu:

$$d_{eff} = d \cdot \sqrt{a_p / (d - a_p)} \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

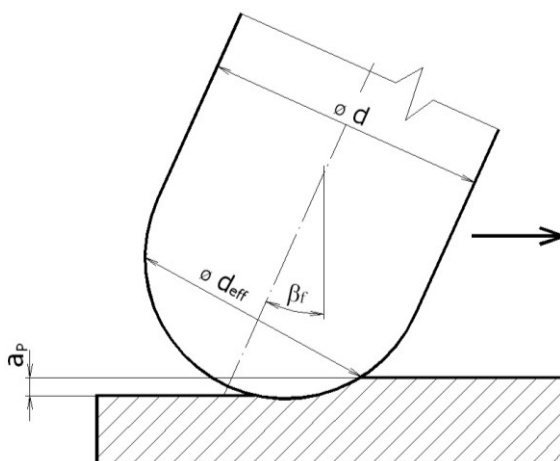
kde: a_p je axiální přísuv nástroje (hloubka řezu) [mm],

d je průměr frézy [mm],

d_{eff} je skutečný (efektivní) průměr frézy [mm].

Díky naklopení nástroje se změní efektivní průměr frézy a tím i výsledná (skutečná) efektivní řezná rychlost. Zlepší se i jakost povrchu (ověřeno experimentem) a trvanlivost nástroje. Velmi důležitý je směr posuvu nástroje. Pokud je způsob posuvu nástroje označován jako tažený viz. *Tažený nástroj při naklopení kulové frézy*, má nástroj tišší chod a zlepšuje se i povrch obráběného materiálu, oproti u způsobu označovaného jako tlačení, viz. *Obr. 73 Tlačení nástroj při naklopení kulové frézy*. Tyto dva způsoby mohou být použity u naklopení ve směru posuvu a také u naklopení, které je kolmé na směr posuvu. Také použití sousledného, či nesousledného způsobu frézování má na jakost povrchu a životnost nástroje velký vliv.

Tříosé obráběcí centrum s možností naklopení čtvrté osy, nebo pětiosé obráběcí centrum, u kterého je možné naklonění vřetena v jakémkoliv směru, umožňuje efektivnější frézování při malých průměrech frézy.

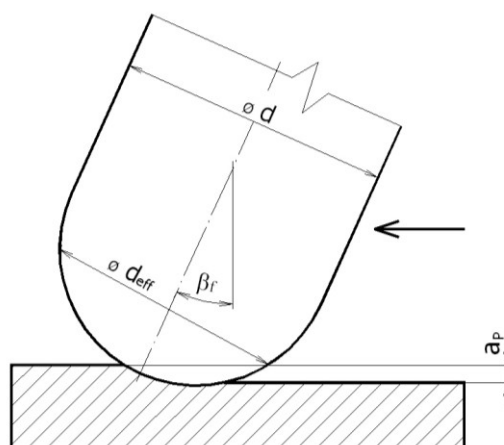


Obr. 73 Tažený nástroj při naklopení kulové frézy

Efektivní průměr kopírovací frézy při frézování taženým nástrojem se vypočte dle vztahu:

$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{d - 2 a_p}{d} \right) + \beta_f \right] \quad [\text{mm}] \quad (5.2)$$

kde: a_p je axiální přísuv nástroje (hloubka řezu) [mm],
 β_f je úhel naklonění nástroje ve směru posuvu [°],
 d je průměr frézy [mm],
 d_{eff} je skutečný (efektivní) průměr frézy [mm].



Obr. 74 Tlačený nástroj při naklonění kulové frézy

Efektivní průměr frézy při frézování tlačeným nástrojem se vypočte dle vztahu:

$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{d - 2 a_p}{d} \right) - \beta_f \right] \quad [\text{mm}] \quad (5.3)$$

kde: a_p je axiální přísuv nástroje (hloubka řezu) [mm],
 β_f je úhel naklonění nástroje ve směru posuvu [°],
 d je průměr frézy [mm],
 d_{eff} je skutečný (efektivní) průměr frézy [mm].

Efektivní řezná rychlost se vypočte dle vztahu:

$$v_{c,eff} = \frac{\pi \cdot n \cdot d_{eff}}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (5.4)$$

kde: d_{eff} je skutečný (efektivní) průměr frézy [mm],
 n jsou otáčky frézy [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$],

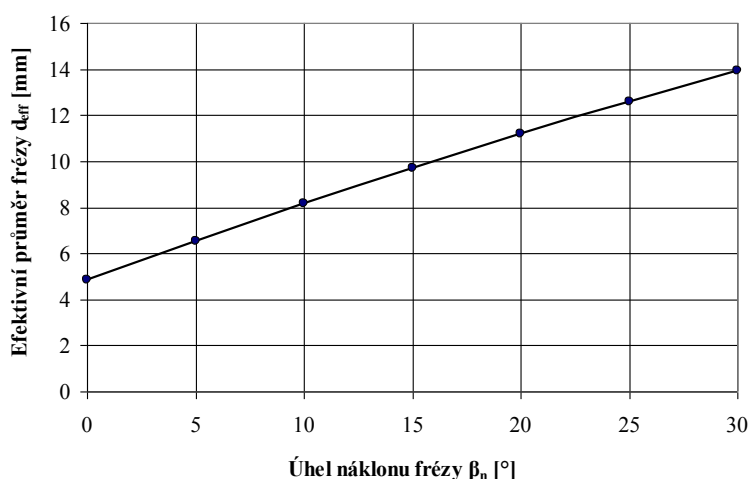
$v_{c,eff}$ je skutečná (efektivní) řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$].

Z uvedených vzorců plyne, že při použití náklonu frézy roste skutečný (efektivní) průměr frézy d_{eff} a proto i skutečná (efektivní) řezná rychlost $v_{c,eff}$.

Konkrétní příklad ukazuje Tab. a následně graf na 74. Kde je znázorněna závislost efektivního průměru frézy d_{eff} na úhlu naklonění frézy β_n při frézování kulovou frézou průměru $d = 20$ mm, hloubky řezu $a_p = 0,3$ mm a otáčkách vřetene $n = 2500$ ot·min⁻¹. Pro srovnání, na průměru $d = 20$ mm řezná rychlost dosahuje velikosti $v_c = 157$ m·min⁻¹, při stejných otáčkách $n = 2500$ ot·min⁻¹.

Tab. 5.1 Hodnoty závislosti efektivního průměru frézy d_{eff} a skutečné řezné rychlosti $v_{c,eff}$ na úhlu naklonění frézy β_n při $d = 20$ mm, $a_p = 0,3$ mm

β_n	d_{eff}	$v_{c,eff}$
[°]	[mm]	[m·min ⁻¹]
0	4,86	38,19
5	6,53	51,32
10	8,16	64,06
15	9,72	76,32
20	11,20	88,00
25	12,61	99,00
30	13,91	109,25



Obr. 75 Závislost efektivního průměru frézy d_{eff} na úhlu naklonění frézy β_n , ($d = 20$ mm, $a_p = 0,3$ mm, $n = 2500$ ot·min⁻¹)

Při frézování složitějších tvarových ploch na sebe navazují jednotlivé případy frézování základních tvarů součástí. Pro udržení stále stejného úhlu naklopení nástroje od kolmice k obráběnému povrchu je nutné, v některých případech, použití víceosého frézování. V těchto případech již nevystačíme obrábět ve třech osách současně spolu s indexovaným naklopením čtvrté osy.

Důležitou částí víceosého obrábění jsou strategie řízení náklonu osy nástroje, jako například:

- definovaný prostorový vektor,
- předklon ve směru pohybu a boční výklon, jeden z úhlů může být variabilní v definovaném rozsahu,
- osa procházející bodem,
- osa procházející přímkou,
- interpolace mezi definovanými vektory,
- 4 osá strategie, kdy jedna osa je blokována. Je zde optimalizovaný úhel v závislosti na křivosti plochy - adaptivní náklon dovoluje maximální úběr materiálu, zvýšení kvality povrchu a redukci času obrábění.



Kontrolní otázka

V jakém rozmezí lze používat úhel naklopení nástroje?

Čeho dosáhneme naklopením nástroje?

6. Výběr technologie víceosého obrábění

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

Budete umět:

- Popsat výběr technologie pro víceosé obrábění

Budete umět

Budete schopni:

- Popsat problematiku 5-osého obrábění

Budete schopni

V oblasti obrábění forem a zápuštěk je většina hrubovacích operací vykonána na 3 osých vertikálních nebo horizontálních obráběcích centrech. V této oblasti je náročné obrábět hluboké dutiny nebo vysoké výstupky. Hluboké dutiny jsou navrženy s odstupňovanými stěnami, většinou pod úhlem 1 nebo 2 stupni a většinou s nerovnými plochami s malými zaobleními přechodu stěn s plochami. Obrábění těchto zaoblení na 3 osých centrech vyžaduje dlouhé frézovací nástroje s kulovým břitem. Malé šířky řezu těchto fréz (řádkování) způsobují příliš dlouhé časy obrábění. V procesu řezu pak působí velké síly řezání a vibrace. Tyto aspekty způsobují časté defekty frézovacího nástroje, jeho zvýšené opotřebení a horší kvalitu obrobeneho povrchu.

V zahraniční literatuře se lze setkat s různými porovnáními 5-osého a 3-osého obrábění. V literatuře [3], [4] autoři porovnávají výhody a nevýhody pěti a tříosého frézování zápuštěk stopkovou frézou s rádiusem v rohu. Tyto porovnání jsou však u součástí vyrobitelných oběma technologiemi. Jedná se o to, aby zadaná součást byla schopna být vyrobena také "tou méně zdatnou" technologií 3 osého obrábění. Při využití 3-osého obrábění mělké kapsy ve tvaru křivky je zapotřebí extrémně mnoho přejezdů pro dosažení požadovaného povrchu, než při použití 5-osého frézování. Díky kontinuálnímu regulování naklápění nástroje, které umožňuje pětiosé obrábění, bylo dosaženo snížení strojního času s respektováním požadované drsnosti. Autoři uvádějí snížení času o 200 až 400 % v závislosti na použitých strategiích frézování.

Jsou časté případy firem vlastníků 5-osé frézovací centra, které nedokáží plně využít výhod těchto obráběcích strojů. Problematika 5-osého obrábění je dosti složitá a programátoři

tvořící programy pro tyto moderní obráběcí stroje nemají dostatek zkušeností pro komplexní a plné využití pohybu všech os současně. Programování dráhy nástroje v pěti osách současně (X, Y, Z, A, B) je velice obtížná a nesnadná je i automatická verifikace proti nebezpečí kolizí. Dá se říci, že pětiosé programování je „spíše umění než věda“, neboť programátor musí přistupovat ke každému tvaru formy individuálně a hledat strategie, vhodné sklony i dráhy nástroje s cílem obrobení nejvyššího povrchu, největší přesnosti a minimalizace dalších dokončovacích operací.



Kontrolní otázka

V čem je složitost 5-osého obrábění?



Použitá a doporučená literatura k dalšímu studiu pro kapitoly 3 až 6

- [1] APRO, K. *Secrets of 5-Axis Machining*, Industrial Press, Inc. 989 Avenue of the Americas, New York, NY 10018, First Printing, August, 2008, pp. 172. ISBN 978-0-8311-3375-7.
- [2] AB Sandvik Coromant. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. 1. vyd.. Praha, 1997. 980 s. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [3] GREY, P.; BENDI, S.; ISMAIL, F.; RAO, N.; MORPHY G.. *Comparison of 5-axis Finis Machining of Hydroforming Die Inserts*. Advanced Manufacturing Technology, 2001. Springer-Verlag London Limited.
- [4] FORNŮSEK, T. CAD/CAM/CIM systémy: Od pomocníků k virtuální továrně. časopis *Technik*, duben 2004.
- [5] HILDER, T. *CNC-mozek stroje*. MM Průmyslové spektrum, 2003, č.5, s. 38-39. ISSN 1212-2572.
- [6] JASPAR, J. *Nové hvězdy mezi frézami pro nástrojárny a výrobce forem*. MM Průmyslové spektrum, 2003, č.5, s. 46. ISSN 1212-2572.

- [7] JANDEČKA, K.; KOŽMÍN P.. *Aspekty využívání nových typů interpolací v programování NC strojů*. Strojírenská technologie, roč. VIII, č. 4, prosinec 2003, s. 16-19.
- [8] KOVÁŘ, J. *Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování*. MM Průmyslové spektrum, 2004, č.4, s. 30 - 32. ISSN 1212-2572.
- [9] KOŽMÍN, P. *Kdy nasadit NC technologie a CAM řešení*. Příspěvek na semináři pořádaný na KTO s firmou Expert&Partner. Plzeň, ZČU únor 2001.
- [10] KOCMAN, Karel. *Speciální technologie obrábění*. Vysoké učení technické v Brně, 2004. 127 s. ISBN 80-214-2562-8.
- [11] KURIC, I.; KOŠTURIK J.; JANÁČ, A.; PETERKA J.; MARCINČIK J. *Počítačom podporované systémy v strojárstve*. Edis Žilina, Žilinská univerzita v Žilině, 2002. 351 s. ISBN 80-7100-948-2.
- [12] SADÍLEK, Marek. *Vyspělé strategie ve 3D frézování*, MM Průmyslové spektrum, 2004, č.12, s. 46,47. ISSN 1212-2572.
- [13] SADÍLEK, M. *Zvyšování efektivnosti obrábění s využitím CAD/CAM systému*. Disertační práce. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. 123 stran, 23 příloh.
- [14] SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J. Functional surface properties of free form surfaces milling. *Scientific Bulletin 2008*, North University of Baia Mare, Romania, 2008, ISSN 1224-3264.
- [15] SADÍLEK, M. Strategie frézování naklopeným nástrojem – realizace experimentů. *MM Průmyslové spektrum*, 2006, č.5, s. 28, 29. ISSN 1212-2572.
- [16] SONETECH s.r.o. *Integrovaný programovací systém pro číslicově řízené stroje - EdgeCAM - Frézování – EdgeCAM intelligent manufacturing*. Uživatelská příručka, 80 stran, pdf dokument, 2005.
- [17] SLÁMA, Josef. *Moderní metody měření na obráběcích strojích*. MM Průmyslové spektrum, 2003, č.5, s. 33. ISSN 1212-2572.
- [18] ŠTĚDRÝ, Jan. *Směry vývoje CNC řízení po roce 2000 v praxi*. MM Průmyslové spektrum, 2003, č.5, s. 36-37. ISSN 1212-2572.
- [19] URBAN, J. *Řídicí systém a výroba forem a nástrojů technologií HSC*. MM Průmyslové spektrum, 2003, č.12, s. 44-45. ISSN 1212-2572.

- [20] PETERKA, Josef. *Nový přístup výpočtu střední aritmetické odchylky drsnosti obrobeného povrchu při kopírovacím frézováním*. Strojírenská technologie, 2004, roč. IX, č.2, s. 28-32.
- [21] ZELENÝ, Jaromír. *Vliv HSC technologií na stavbu obráběcích strojů*. MM Průmyslové spektrum, 2000, č.6, s. 24-27. ISBN 80-85986-19-1.
- [22] ZELENÝ, J. *Nástup HSC technologií do průmyslové praxe*. MM Průmyslové spektrum, 2000, č.6, s. 22-23. ISBN 80-85986-19-1.
- [23] ZELENÝ, J. *Numerically controllers machine tools and accessories*. 1999, 165 s. Vydavatelství ČVUT.
- [24] http://www.orlicko.cz/pm/ncspeed/NCspeed_WorkNC/Hlavni_stranka_NCspeed_WorkNC.htm - informace o optimalizačním softwaru NC speed.
- [25] <http://www.frezovani-5os.cz> – webové stránky o víceosém obrábění, citováno 19.7. 2010.
- [26] <http://www.formtec> - Firemní stránky společnosti Formtec
- [27] <http://www.cgtech.com> - Firemní stránky společnosti CGTech,



Klíč k řešení

- O 1.1. Současným trendem ve strojírenství je kladení důrazu na kvalitu a efektivitu výroby, na její technickou, ekologickou i estetickou úroveň. Rovněž se soustředí na hospodaření se surovinami a energií.
- O 1.2. Zaváděním vhodných systémů pro hospodaření s náradím se může stát účinným prostředkem ke zvýšení produktivity a snížení výrobních nákladů.
- O 1.3. Při klasickém obrábění dochází ve smykové rovině k mechanickému zpevnění třísky.
- O 1.4. Potřebná teplota může být dosažena laserovým předehříváním obráběného materiálu, a to těsně před jeho vstupem do primární zóny stříhu.
- O 1.5. Oblast přípustných řešení je dána především technickými omezeními, konstrukčními podmínkami, ale i technologickými zákonitostmi.

- O 1.6. Strojový park a jeho technologické parametry, umožňující realizaci zakázky v požadované přesnosti a jakosti. Výrobní kapacity, které dávají společnosti předpoklady realizovat zakázku v požadovaném množství a termínu, bez ohrožení výroby stálých zakázek. Ekonomické faktory, určující, bude-li případná realizace zakázky pro výrobce výhodná z hlediska zisku.
- O 2.1. Pevnost v tlaku, tvrdost v tlaku, houževnatost a pevnost v ohybu, pevnost za tepla a odolnost proti teplotním rázům, odolnost proti otěru (adheze, difuze, nárůstky...), chemická stálost a chemicky neutrální chování vůči obráběným materiálům, odolnost proti vzniku trhlin a pevnost vazby vnitřních fází, vysoká řezivost.
- O 2.2. Vyrábí se z nich málo namáhané nástroje jako např. ruční nástroje a nářadí (pilníky, škrabáky, nože, sekáče, sekery, kladiva...), nože strojních nůžek a kamenické nářadí.
- O 2.3. Homogenní struktura, dobré technické vlastnosti – tvařitelnost, broušitelnost, lešitelnost, tvarová a rozměrová stálost při slinování, zlepšená houževnatost, materiálová a ekonomická náročnost.
- O 2.4. Hlavní výhodou MTCVD technologie je to, že v důsledku nižší reakční teploty dochází ke značnému nárůstu houževnatosti, případně jejímu zachování.
- O 2.5. Na bázi oxidu hlinitého, čistá (oxidická), směsná, vyztužená, na bázi nitridu křemíku.
- O 3.1. Adaptivní řízení, aktivní kontrola, diagnostika, kompenzace deformace nástroje, aktivní kontrola rozměrů obrobku, identifikace stavu řezných nástrojů v průběhu řezného procesu, identifikace stavu a seřízení nástrojů mimo řezný proces, minimalizace teplotních deformací rámu strojů, aj.
- O 3.2. Rychlost a přesnost, funkce ovládání, komunikace s okolím, diagnostika.
- O 3.3. Tam kde dochází k větším odebíraným objemům materiálu a zároveň je nutné dosáhnout hospodárně vysoké kvality povrchu po obrobení.

- O 3.4. Zkrácení času obrábění, zvýšení trvanlivosti nástroje, zvýšení efektivnosti obrábění, stabilitu obrábění - omezení chvění apod.
- O 3.5. sortiment výroby, strojový park, ekonomické hledisko, softwarové a hardwarové vybavení společnosti, problematika postprocesorů, zkušenosti uživatelů s jinými CAD/CAM systémy, technická podpora při tvorbě programů, podmínky zaškolování programátorů, podmínky aktualizace softwaru, a jiné.
- O 3.6. v CNC řídicích systémech většinou rozdělí na úseky přímkové, rovinné, prostorové a kruhové rovinné. Složitější pohyb nástroje je nutné segmentovat nejčastěji na jednotlivé přímkové úseky.
- O 3.7. Jednoduše řečeno, jde o překlad INC souborů (tedy již vygenerovaných drah nástroje) do řeči srozumitelné příslušnému řídicímu systému obráběcího stroje.
- O 3.8. Snížení zmetkovitosti způsobené chybami měření, zkrácení časů seřízení nástrojů a ustavení obrobků, snížení nákladů na upínací přípravky, snížení provozních nákladů na obsluhu stroje, detekce poškozených nástrojů, zvýšení bezpečnosti práce, zlepšení kontroly procesu.
- O 4.1. Smyslem této progresivní technologie je snížit cenu výrobku při nižší energetické náročnosti, nežádoucích ekologických dopadech, a to při současném zvýšení jeho kvality.
- O 4.2. Při obrábění tvarové plochy kulovou, nebo stopkovou frézou s rádiusem v rohu, dochází vlivem velikosti kroku přejezdů, rádiusu nástroje a zakřivení povrchu, ke vzniku výstupků na obrobeném povrchu.
- O 4.3. Funkce zajišťující doobrobení (dobírání) koutů a dokončování rádiusů.
- O 4.4. Aplikací pětiosého obrábění, lze docílit efektivní obrobení zakřiveného povrchu (technologií 3 osého obrábění toto nelze).
- O 4.5. Snížení času výroby, možnost komplexního obrobení dílu, možnost opracování dílců mnohem efektivněji, na menší počet upnutí obrobků – snížení možnosti chyby při seřizování – zvýšení přesnosti, možnost použití kratších nástrojů pro

docílení produktivnějšího obrábění a zvýšení trvanlivosti nástrojů, zlepšení funkčních vlastností obrobeneho povrchu (parametrů drsnosti povrchu, mikrotvrdosti, zpevnění povrchové vrstvy, atd.) díky obrábění mimo osový střed nástroje, zvýšení přesnosti výroby, možnost využití vyšších řezných a posuvových rychlostí.

- O 5.1. Používá se v rozmezí 10 až 30 °.
- O 5.2. Díky naklopení nástroje se změní efektivní průměr frézy a tím i výsledná (skutečná) efektivní řezná rychlost. Zlepší se i jakost povrchu (ověřeno experimentem) a trvanlivost nástroje.
- O 6.1. Problematika 5-osého obrábění je dosti složitá a programátoři tvořící programy pro tyto moderní obráběcí stroje nemají dostatek zkušeností pro komplexní a plné využití pohybu všech os současně. Programování dráhy nástroje v pěti osách současně (X, Y, Z, A, B) je velice obtížná a nesnadná je i automatická verifikace proti nebezpečí kolizí. Dá se říci, že pětiosé programování je „spíše umění než věda“, neboť programátor musí přistupovat ke každému tvaru formy individuálně a hledat strategie, vhodné sklony i dráhy nástroje s cílem obrobění nejkvalitnějšího povrchu, největší přesnosti a minimalizace dalších dokončovacích operací.