

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HSS STOPKOVÉ FRÉZY S PVD POVLAKY A JEJICH VYUŽITÍ V PRAXI

HSS END MILLING CUTTERS WITH PVD COATINGS AND THEIR USE IN PRACTICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Vondra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jiří Vondra
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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

HSS stopkové frézy s PVD povlaky a jejich využití v praxi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je popsána technologie frézování, charakteristika rychlořezných ocelí a povlakovacích metod. Součástí práce je provedení experimentu, kde hlavními monitorovanými parametry je silové zatížení a opotřebení břitu.

Cíle diplomové práce:

1. Charakteristika rychlořezných ocelí.
2. Charakteristika technologie frézování.
3. Charakteristika povlakovacích metod.
4. Zhotovení experimentální části.
5. Vyhodnocení experimentu.

Seznam doporučené literatury:

FREMUNT, P., KREJČÍK, J., PODRÁBSKÝ, T. Nástrojové oceli. 1. vyd. Brno: Dům techniky Brno, 1994. 234 s.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

MATTOX, M. Handbook of Physical Vapour Deposition (PVD) Processing. 2. vyd. Albuquerque (USA): APR 2010. 917 s. ISBN: 978-0-8155-2037-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá trvanlivostí PVD povlaku při čelním drážkovém frézování. V teoretické části je uveden rozbor rychlořezných ocelí, přehled frézování a přehled povlakovacích metod. Experimentální část je zaměřena na silové poměry při frézování stopkovou frézou a její opotřebení. Z experimentu plyne, že nanokompozitní povlaky snižují řezné síly, ale nevytváří za daných řezných podmínek nejtrvanlivější nástroj.

Klíčová slova

frézování, HSS, PVD povlaky, povlakování, opotřebení nástrojů

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the durability of PVD coating in front groove milling. In the theoretical part there is the analysis of high-speed steels, a survey of milling and an overview of coating methods. The experimental part is focused on the power ratios during milling with a router cutter and its wear. From the experiment it is possible to conclude that nanocomposite coatings reduce cutting forces, but do not produce the most durable tool under the cutting conditions.

Key words

milling, HSS, PVD coatings, coating, tool wear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VONDRA, Jiří. *HSS stopkové frézy s PVD povlaky a jejich použití v praxi*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 58 s. 4 přílohy. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **HSS stopkové frézy s PVD povlaky a jejich použití v praxi** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Jiří Vondra

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu Ing. Aleši Jarošovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Rád bych poděkoval také panu Jiřímu Čechovi za pomoc při provádění experimentu a společnosti IMS Drašnar s.r.o. za materiální pomoc.

V neposlední řadě patří velké díky rodině za podporu během celé doby studia.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 RYCHLOŘEZNÉ OCELI	9
1.1 Rozdělení a značení HSS dle chemického složení.....	10
1.1.1 Chemické složení rychlořezné oceli a jeho charakteristika.....	10
1.2 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí.....	12
1.3 Značení rychlořezných ocelí a vybrané druhy	15
2 FRÉZOVÁNÍ.....	18
2.1 Kinematika frézování.....	18
2.1.1 Sousedné frézování.....	19
2.1.2 Nesousedné frézování.....	19
2.1.3 Pohyby a rychlosti	20
2.2 Analýza průřezu třísky	20
2.3 Silové působení.....	21
3 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ	23
4 CHARAKTERISTIKA POVLAKOVACÍCH METOD	25
4.1 Povlakovací metody	25
4.2 PVD fyzikální metoda.....	25
4.2.1 Napařování	26
4.2.2 Napařování.....	27
4.2.3 Iontová implementace.....	29
4.3 Příprava nástrojů z HSS před povlakováním	29
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	31
5.1 Obráběcí stroj.....	31
5.2 Obráběný materiál.....	32
5.3 Obráběcí nástroje	32
5.3.1 Nepovlakovaný nástroj (A).....	33
5.3.2 Povlakovaný nástroj – povlak nACo [®] (B).....	34
5.3.3 Povlakovaný nástroj – povlak AlTiN (C).....	34
5.3.4 Povlakovaný nástroj – povlak AlTiCrN (D).....	35
5.4 Řezné podmínky.....	35
5.5 Měřicí aparatura	35

5.6	Průběh experimentu	37
6	ROZBOR VÝSLEDKŮ	40
6.1	Grafické vyhodnocení silového působení	40
6.2	Průměrné hodnoty velikosti sil v časové závislosti.....	42
6.3	Trvanlivost a vliv povlaků dle kriteria VB	45
6.4	Analýza jakostí povrchu.....	49
	ZÁVĚR	51
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	56
	SEZNAM PŘÍLOH.....	58

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá frézováním stopkovými frézami z rychlořezné oceli. Obrábění tímto typem frézy je velmi rozšířené. Nejčastěji se využívá při výrobě lisovacích nástrojů a forem pro vstřikování plastických hmot. Rychlořezné oceli mají i v moderní době stále své využití díky své nízké ceně a vysoké houževnatosti. S použitím PVD povlaků mohou být využity i pro nejnáročnější aplikace ^{1,2}.

Mezi nástrojové oceli lze zařadit oceli rychlořezné. Ty jsou vysoce legované a jsou schopné obrábět při řezných rychlostech v řádech desítek $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. HSS oceli mají své vlastnosti díky správnému chemickému složení a složitému tepelnému zpracování. To se skládá ze stupňovitého ohřevu a kalení. Celé tepelné zpracování je zakončené popouštěním. V současnosti však místo rychlořezných ocelí přebírají slinité karbidy a další nástrojové materiály nové generace ¹.

Aby mohly být nástroje z HSS oceli odolnější, je využíváno tenkých povlaků. Existují dvě základní metody povlakování, a to fyzikální a chemická metoda. Pro povlakování rychlořezných ocelí je využita metoda fyzikálního napařování. Odolnější nástroje mají příznivý vliv na ekonomiku celého procesu ².

Cílem práce je srovnání tří nástrojů s různými typy povlaků a nástroje, který je bez povlaku. Hodnoceno je silové namáhání nástroje a jeho následné opotřebení vlivem fyzikálně-mechanických a chemických pochodů ⁴.



Obrázek 1 Povlakovaná stopková fréza ².

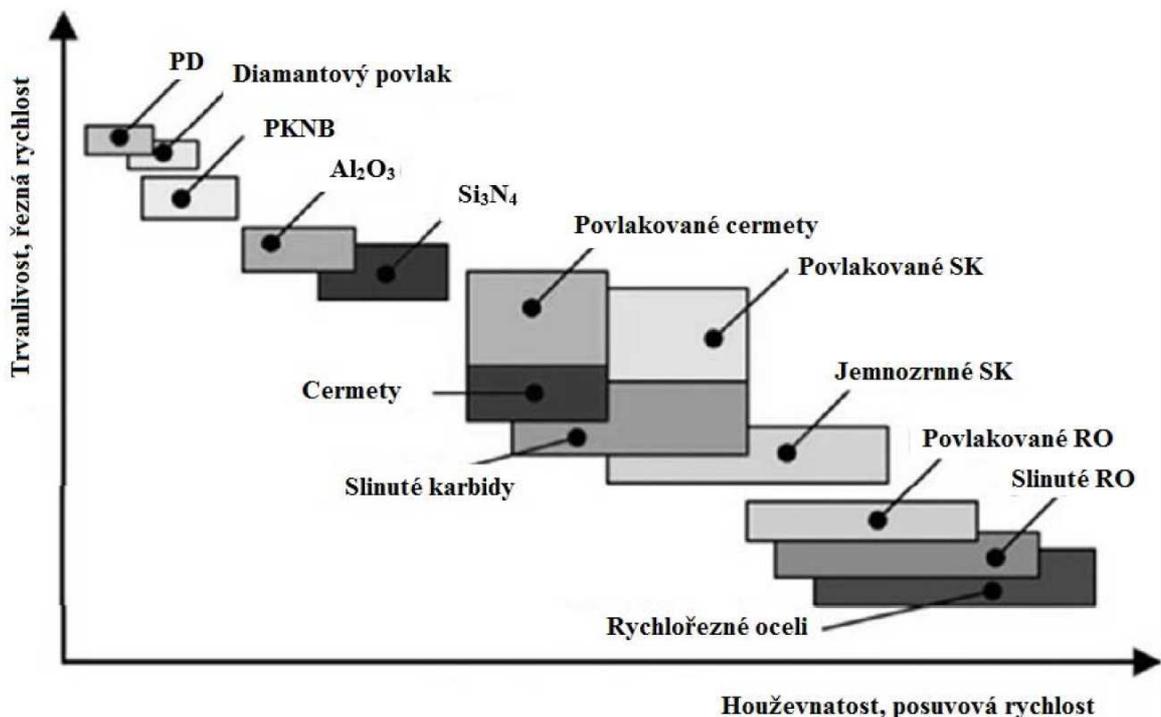
1 RYCHLOŘEZNÉ OCELI

Mezi zvláštní typy nástrojových ocelí patří oceli rychlořezné. Toto přívlastko získaly díky navýšení možných řezných rychlostí z jednotek až na $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Při obrábění vyššími řeznými rychlostmi (v řádech desítek metrů za minutu) dochází ke vzniku vysokých teplot, které popouští nízkolegovaný martenzit a tím jeho tvrdost výrazně klesá. Proto je třeba legovat ocel více, zejména prvky, které zvýší odolnost martenzitu proti popouštění. Tyto oceli se tak převážně používají pro řezné nástroje jako jsou vrtáky, frézy, soustružnické nože, a další. S rychlořeznými oceli se lze někdy setkat i u nástrojů, které jsou určeny k tváření ^{1,4}.

Nástroje z HSS lze třískově obrábět v jakémkoliv tvaru a velikosti, a proto jsou těžko nahraditelné slinutými karbidy či jinými tvrdými řeznými materiály ².

Předchůdcem dnešních HSS se stala již v roce 1868 ocel se 2 % C, 7 % W a 2,5 % Mn, která byla navržena Mushetem v Anglii. Její řezivost byla nízká, a proto bylo třeba materiál i nadále vyvíjet. V roce 1900 bylo R.W. Taylorem a W. Whitem navrženo nové složení s 1,85 % C, 8 % W, 7,8 % Cr a 0,3 % Mn. Chemické složení bylo později modifikováno na 0,7 % C, 19 % W, 5,5 % Cr a 0,3 % V. Současně se zjistilo, že tato wolframová ocel si zachovává tvrdost i při vyšších teplotách. Podmínkou však je dostatečné množství rozpuštěných legur v austenitu při tepelném zpracování, které zpomalují rozpad austenitu po zakalení ^{1,3}.

Pro větší tepelnou stálost se ukázalo pozitivním zvýšit obsah vanadu na 1 %. Tento objev je připisován J. A. Mathewsovi. Další výzkum ukázal, že lze snížit obsah W při zvýšení obsahu vanadu, dále se využil pozitivní vliv kobaltu na možnosti zvýšení řezných rychlostí. Dalším významným legujícím prvkem v dnešní době je molybden, který má ale své výhody a nevýhody. Ty jsou uvedeny v podkapitole 1.1.1 ^{1,4}.



Obrázek 1.1 Přehled nástrojových materiálů ⁴.

Nástrojové oceli lze dělit podle chemického složení na nelegované (uhlíkové), nízko až středně legované a vysokolegované (rychlořezné) oceli.

Rychlořezné oceli pak dělíme podle typu výroby na:

- tvářené,
- lité,
- vyrobené práškovou metalurgií.

Ve starších odborných zdrojích se lze setkat i s dělením podle výkonu (pro běžné použití, výkonné a vysoce výkonné). Toto rozdělení se však už nepoužívá a nejčastěji se setkáváme s dělením dle chemického složení^{1,4,5}.

1.1 Rozdělení a značení HSS dle chemického složení

Rozdělení a značení rychlořezných ocelí dle chemického složení¹:

- Wolfram-chrom-vanadové oceli
- Wolfram-chrom-molybden-vanadové oceli
- Wolfram-chrom-vanad-kobaltové oceli
- Wolfram-chrom-molybden-vanad-kobaltové oceli.

Dle ČSN EN rychlořezné oceli začínají vždy písmeny HS a následující čísla udávají střední obsahy prvků v pořadí W-Mo-V-Co⁶.

1.1.1 Chemické složení rychlořezné oceli a jeho charakteristika

Množství prvků a fází ve slitinách železa je udáváno ve hmotnostních procentech – hm. %.

Uhlík

Jeho obsah se v dnešních RO pohybuje v rozmezí 0,65–1,5 %. Spodní hranice je dána požadavkem pro absenci deltaferitu v matici. Ten silně snižuje řezivost. Při nadměrném množství uhlíku se tvoří karbid cementitového typu M_3C . Ten se při austenitizaci zcela rozpouští

a zvyšuje množství nežádoucího zbytkového austenitu. S vyšším procentem uhlíku je řezivost lepší u nepřerušovaného řezu, u přerušovaného naopak klesá houževnatost kvůli vyššímu obsahu karbidů^{1,4,6}.

Wolfram

Základním legujícím prvkem je wolfram. Část je vázána na uhlík jako karbid a část je rozpuštěna v matici materiálu. V soustavě železo-wolfram-uhlík se vytváří několik typů karbidů například Fe_4W_2C . Wolfram má také vliv na teplotní stálost oceli (stejně jako molybden, vanad, kobalt), protože zůstává v matici rozpuštěný i po zakalení. Oceli s obsahem 10–12 % W a až 5 % V mají, proti ocelím s původními 18 % W a 1 % V, stejnou řezivost. Zároveň je dosaženo lepších plastických vlastností, nižších kalících teplot a nižších cen^{1,4,6}.

Chrom

Část tohoto prvku je v litém stavu rozložena v matici a část tvoří karbid $M_{23}C_6$, ve kterém se rozpouští i malé množství wolframu, železa, molybdenu a vanadu. Při austenitizaci se tento karbid zcela rozpouští. Chrom v rozpuštěném stavu zvyšuje prokalitelnost a rozpouštěný uhlík zakalitelnost. Tento rozpouštěný uhlík pak snižuje teplotu

martenzit start (M_s) a martenzit konec (M_f) a tím roste obsah zbytkového austenitu (A_{zb}). Maximální obsah A_{zb} je 25 %, proto je obsah chromu 3,5–5 %^{1,4,6}.

Vanad

Vanad je vázán v největším množství jako karbid V_4C_3 , ve kterém se rozpouští i drobné množství wolframu, molybdenu a chromu. Obsah vanadu se u HSS ocelí volí podle množství uhlíku a wolframu. Při 12% W a 0,8 % C je ocel se 2 % V. S rostoucím procentem uhlíku roste i procento vanadu. Při velkém nárůstu však vzniká mnoho tvrdých karbidů v matici. Ty zlepšují odolnost proti opotřebení a řezivost, nástroje je však nutné brousit kotouči z kubického nitridu boru. Pokud se zvyšuje pouze množství vanadu, dochází ke stabilizaci delta feritu a klesá řezivost. Drobné karbidy vanadu se rozpouštějí až nad teplotou kalení. Díky nim tak při výdrži na kalící teplotě neroste zrno^{1,4,6}.

Molybden

Tento prvek je u HSS částečnou nebo úplnou náhradou za wolfram. Počítá se, že při obsahu Mo nad 5 % je 1 % stejně účinné jako 1,4–1,9 % W. Dle obsahu Mo dělíme oceli do tří skupin:

- Mo < 2 %, Molybden zde zvyšuje řezivost
- Wolframolybdenové oceli 6/5/2 (6 % W, 5 % Mo a 2% V)
- Molybdenové rychlořezné oceli, kde je wolfram pouze doplňující přísadou (cca 2 % W při 9 % Mo a 1 % V).

Poslední typ ocelí má proti ostatním vyšší houževnatost. Tyto slitiny jsou proto vhodné pro nástroje s přerušovaným řezem – frézy. Nevýhodou zůstává náchylnost na oduhličení a přehřátí při kalení^{1,4,6}.

Kobalt

Kobalt jako jeden z mála prvků v ocelích netvoří karbidy. Po zakalení je rozpuštěno až 98 % Co a zbytek se rozpouští v karbidech M_6C . Díky kobaltu je možné HSS kalit z vyšších teplot a v austenitu se rozpouští více legujících prvků a tím se zvýší odolnost proti popuštění. S vyšším obsahem kobaltu roste i obsah zbytkového austenitu, proto je třeba HSS popouštět třikrát až pětkrát.

Tabulka 1.1 Vliv kobaltu na pracovní teploty¹.

Kobalt [%]	Maximální pracovní teplota [°C]
3	620
5	630
10	350
15	670

Nevýhodou kobaltových rychlořezných ocelí je sklon k oduhličování při tepelném zpracování, nižší houževnatost, pevnost a vyšší cena^{1,4,6}.

Mangan

Tato legura zhoršuje obrobiteľnosť rychlořezných ocelí, které jsou tepelně zpracované žháním na měkko. Obvykle jeho množství bývá omezeno na maximálně 0,45 %¹.

Křemík

Křemík stabilizuje deltaferit, a proto je omezen u běžných rychlořezných ocelí na 0,45 % stejně jako mangan. Někdy se však přísada zvyšuje až k 1 % a rostě odolnost proti popouštění. Vysvětlením tohoto jevu je částečná rozpustnost Si v karbidu M_6C , tím pádem je v tomto karbidu méně wolframu a molybdenu. Tyto prvky se vylučují do matrice a rostě tak řezivost. Vyšší obsah křemíku je podle V. Lieberzeita a K. Protivy vhodný pro oceli, které jsou určené pro nástroje k tváření za studena^{1,6,7}.

Titan

Titan vyvazuje uhlík na stabilní karbid TiC, který se rozpouští za vysokých teplot a brání hrubnutí zrna při tepelném zpracování¹.

Nikl

Netvoří karbidy a je tak zcela rozpustný v matrici materiálu. Zvyšuje houževnatost a podíl zbytkového austenitu, proto je jeho obsah omezen maximálně na 0,25 %¹.

Dusík, síra, fosfor

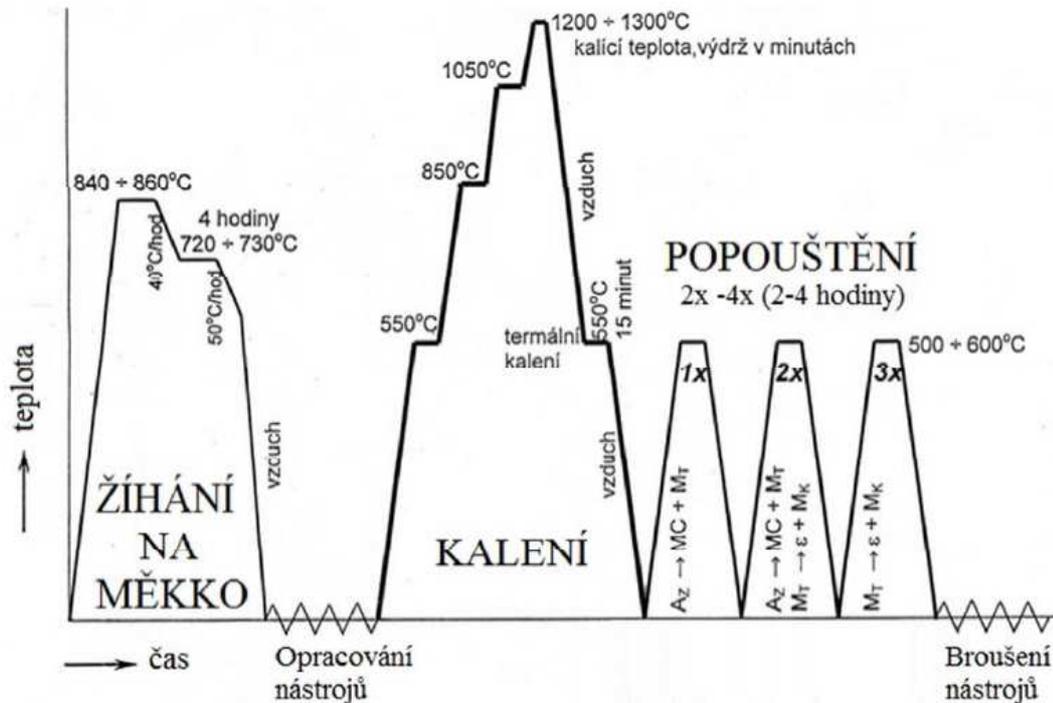
Tyto prvky mají nežádoucí vliv na materiál a tak je nutnost jejich obsah minimalizovat co nejvíce. Vadami jsou například bubliny a horší mechanické vlastnosti (zejména pevnost v ohybu)¹.

Tabulka 1.2 Karbidy v nástrojových ocelích⁶.

Karbid	Tvrdość [HV 0,1]	Tvořící prvky	Popis
M_3C	Asi 950	Fe, (Fe, Cr)	Karbid cementitického typu, poměrně měkký.
$M_{23}C_6$	1 000–1 100	Cr	Při ohřevu na kalící teplotu se karbid úplně rozpouští v matrici a chrom tak zvyšuje prokalitelnost dané oceli.
M_6C	1 200–1 300	W	Při ohřevu na kalící teplotu je část karbidu rozpuštěna a zbytek zůstává a zabraňuje růstu zrn austenitu.
M_7C_3	1 600–1 800	Cr	Stabilní tvrdý karbid, který zvyšuje ořezuvzdornost. ⁸
M_2C	1 700–1 900	W, Mo	Tento karbid precipituje ve struktuře při popouštění za teplot 500 – 600 °C.
$MC(M_4C_3)$	2 200–3 000	V	Jemné a velmi tvrdé karbidy, které se při austenitizaci jen zčásti rozpouštějí a brání hrubnutí zrn austenitu. Precipitují stejně jako M_2C při popouštění 500 – 600 °C.

1.2 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí

Rychlořezné oceli se zpracovávají základními typy tepelného zpracování stejně jako jiné oceli. Prvně je realizováno **žihání** ke snížení vnitřního pnutí, ze kterého lze navázat přímo na žihání naměkko probíhající za teplot okolo 800 °C. To sníží tvrdost polotovaru. Díky tomu je možné snadno opracovat materiál do požadovaného tvaru jen s přídatky na finální broušení. **Kalením** je dosaženo vyšších tvrdostí a následně je tepelné zpracování dokončeno několikanásobným **popouštěním** na finální tvrdost^{1,6,9}.

Obrázek 1.2 Schéma tepelného zpracování HSS ocelí ⁶.

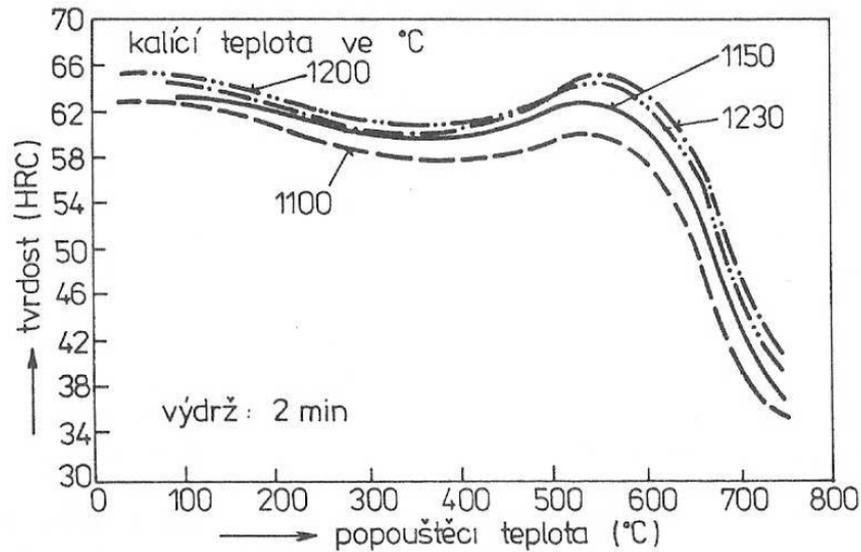
Rozlišujeme dva základní druhy žíhání. Transformační žíhání a žíhání s výdrží pod transformační teplotou, které se běžně nepoužívá, protože je složité udržet v peci teploty (asi 780 °C) v malém rozptylu po dobu 12–16 hodin ¹.

Transformační žíhání naměkko se skládá ze dvou 2–4 hodinových výdrží na teplotách 780–840 °C, respektive 760 °C. Z teplot první výdrže se ochlazuje rychlostí cca 10 °C za hodinu přes překryštalizační interval. Z druhé výdrže se ochlazuje v peci nebo na vzduchu. Výdrž na teplotě je záměrně kratší než v prvním případě, protože se stabilizují karbidy. Ty se pak při následné austenitizaci (při kalícím procesu) pomalu rozpouštějí. Tvrdost po žíhání naměkko se pohybuje od 240 do 270 jednotek tvrdosti podle Brinella - HB ¹.

Při **kalení** se mění měkký a tvárný austenit na tvrdý martenzit. Přeměna však nikdy není úplná. Teplota austenitizace musí být volena s ohledem na rozpouštění karbidů. Pro rovnoměrné prohřátí se používá stupňovitý ohřev, kde první výdrž je na teplotách mezi 500 °C až 550 °C. Druhá výdrž je na 850 °C. Nástroje složitých tvarů obvykle ještě mají třetí stupeň při teplotách nad 1 000 °C. Rychlost ohřevu se volí dle materiálu a především složitosti nástroje. Doba výdrže na teplotě je zhruba 30 sekund na 1 milimetr tloušťky do 650 °C a 1 minuta na 1 milimetr tloušťky. Kalící teplota je přibližně 30–80 °C nad teplotou přeměny A_{c3} , pro podeutektoidní oceli, respektive A_{c1} pro nadeutektoidní oceli. Výdrž na kalící teplotě je u rychlořezných ocelí pouze v jednotkách minut, protože se rozpouštějí karbidy, které brání hrubnutí zrna, ale zároveň pak klesá výsledně dosažitelná tvrdost. Ochladuje se do tří typů prostředí. Pro rychlořeznou ocel 19 830 (1.3343, HS6-5-2C) se dle výše kalící teploty ochlazuje v oleji, solné lázni předeřáté na 500–550 °C dmýchaným vzduchem. Tvrdost po zakalení se pohybuje okolo 60 HRC ^{1, 2, 4, 6, 9, 10, 11, 12}.

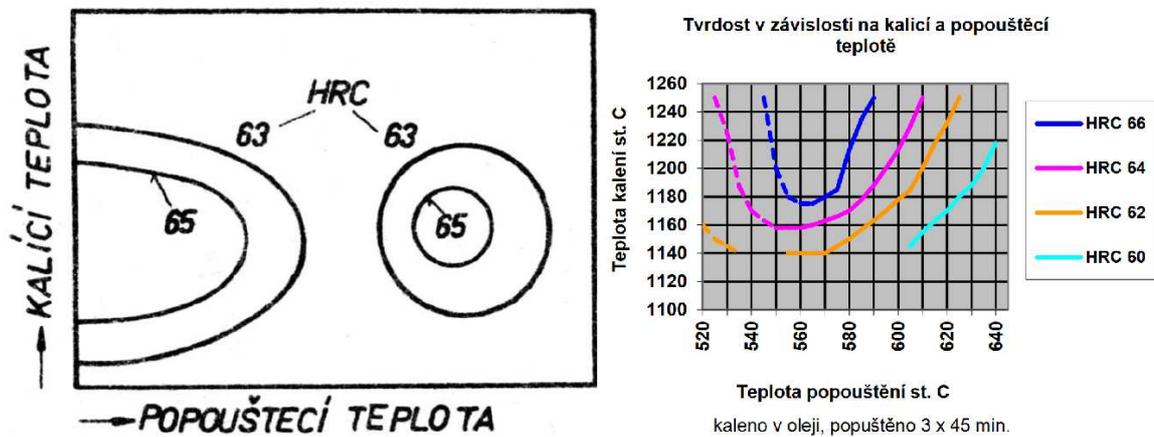
Popouštění získáme nástroje, co nejsou náchylné k praskání. Díky pochodům v materiálu je výsledná tvrdost vyšší než po samotném kalení. Při popouštění za teplot do 400 °C tvrdost klesá. Při zvýšení teplot tvrdost roste, viz obrázek 1.3 - Popouštěcí křivky oceli

19 830. Maximální tvrdost se získá popouštěním při teplotě okolo 550 °C. Výdrž na popouštěcích teplotách je od půl hodiny do přibližně 2 hodin. Tvrdnutí je dáno precipitací jemných karbidů a snížením obsahu zbytkového austenitu^{1,6,10}.



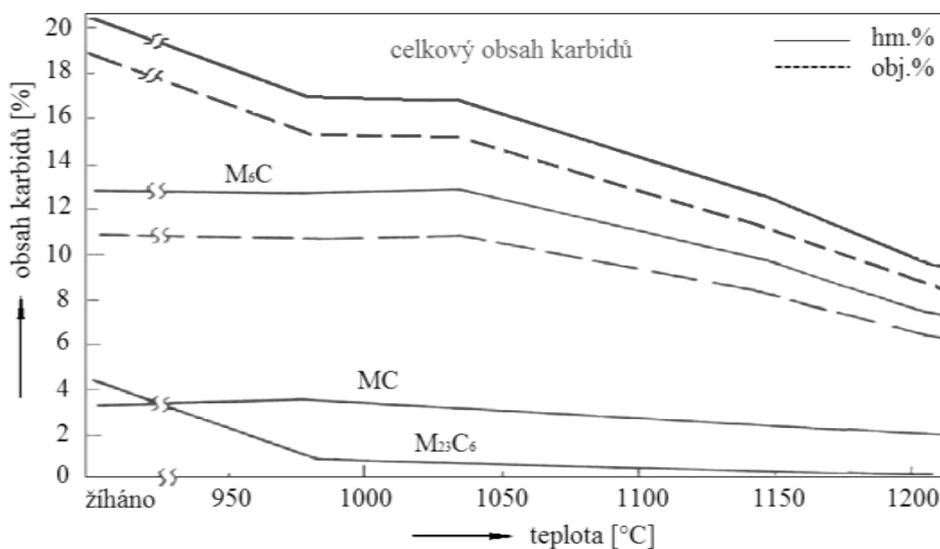
Obrázek 1.3 Popouštěcí křivky rychlořezné oceli 19 830¹

Pro určení tvrdosti v závislosti na popouštěcí teplotě mohou posloužit také vrstevnicové diagramy. Ty jsou obvykle uvedeny v materiálovém listu nebo v příslušné materiálové normě.



Obrázek 1.4 Vrstevnicové diagramy nástrojových ocelí^{6, 11}

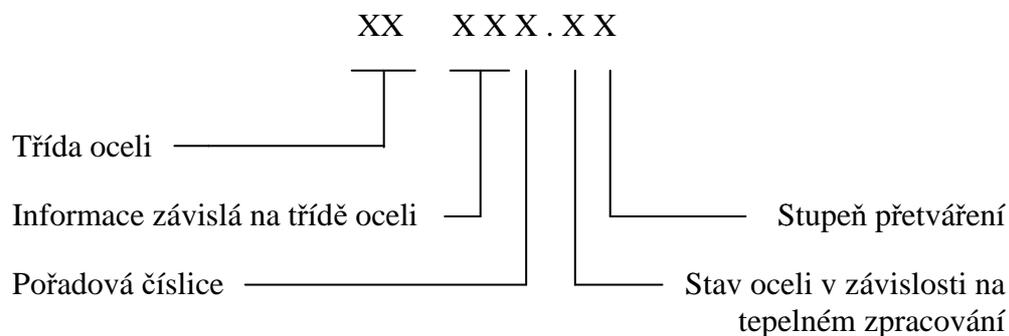
Ve struktuře rychlořezných ocelí se po dokončení tepelného zpracování vyskytuje martenzit, zbytkový austenit a velké množství karbidů. Toto množství je dáno výškou kalící teploty (Obr. 1.5). Martenzit je přesycený tuhý roztok uhlíku v železe alfa (Fe_α). Jeho vznik je podmíněn nadkritickou rychlostí ochlazování. Stejně jako karbidy je tato složka matrice žádoucí. Nežádoucím je však zbytkový austenit, který je měkký a tvárný. Nelze jej 100% odstranit a jeho množství je závislé na procentu uhlíku a dalších legur v něm rozpuštěných^{10, 13, 14}.

Obrázek 1.5 Obsah karbidu v závislosti na kalící teplotě pro ocel 19 830¹

1.3 Značení rychlořezných ocelí a vybrané druhy

Podle norem evropské unie se rychlořezné oceli označují kombinací čísel, které vyjadřují množství legujících prvků v materiálu. Dnes již zastaralá norma ČSN 41 9861, v podnicích ale stále často využívaná, uvádí značení pětímístného číselného kódu.⁴

Schéma číselného značení dle ČSN¹⁵:

Tabulka 1.3 Význam prvního dvojčíslí – třídy ocelí¹⁵.

Třída oceli	Rozdělení podle	
	Použití	Stupně legování
10	Konstrukční	Nelegované
11		
12		
13		Nízkolegované
14		
15		
16		
17	Středně a vysokolegované	
19		Nástrojové Nelegované Legované

Doplňkové číslice za tečkou v označení určují stav po tepelném zpracování (tabulka 1.4) a druhá číslice uvažuje stupeň přetváření válcovaných polotovarů¹⁵.

Tabulka 1.4 Stav oceli – tepelné zpracování¹⁵.

Doplňková číslice	Stav oceli
1X XXX.0	Tepelně nezpracovaný
1X XXX.1	Normalizačně žíhaný
1X XXX.2	Žíhaný (s uvedením typu žíhání)
1X XXX.3	Žíhaný na měkko
1X XXX.4	Kalený nebo kalený a popuštěný při nízkých teplotách, po rozpouštěcím žíhání (austenitické oceli)
1X XXX.5	Normalizačně žíhaný a popuštěný
1X XXX.6	Zušlechtěný na dolní pevnost dané oceli
1X XXX.7	Zušlechtěný na střední pevnost dané oceli
1X XXX.8	Zušlechtěný na horní pevnost dané oceli
1X XXX.9	Stav, který neodpovídá číslicím 0 – 8

Příklad označení dle evropské normy:

Ocel HS 10-4-3-10 (dle ČSN 19 861). Význam prvků ve značení je následující⁴:

HS	High speed (rychlořezná ocel)
10	10 % W
4	4 % Mo
3	3 % V
10	10 % Co

Pro experiment byly použity frézy z materiálu HS2-9-1-8 pro který norma ČSN svůj ekvivalent nemá. V tabulce 1.5 je vybráno několik rozšířených typů rychlořezných ocelí a k nim je uvedena i vhodnost použití¹⁶.

Tabulka 1.5 Příklady používaných HSS ocelí^{16, 17, 18}.

Označení ČSN (ISO)	Hutní označení	Technologické uplatnění
19 802 (HS12-1-2)	Maximum Speciál G Extra	Velmi namáhané nástroje hrubovacím obráběním materiálů o nižší a střední pevnosti do 850 MPa
19 830 (HS6-5-2)	Maximum Speciál M05	Nástroje i s přerušovaným řezem pro materiály s pevností do 900 MPa.
19 855 (HS18-1-2-5)	Maximum Speciál 55	Vysoce namáhané nástroje pro ocel a ocelolitiny o vysokých pevnostech při obrábění vysokými rychlostmi
19 856	Maximum Speciál 55G	
19 857	MKG	Hrubování oceli, ocelolitiny a těžkoobitelných materiálů
19 858 (HS12-1-4-5)	Radeco C	Jemné a přesné obrábění ocelí a ocelolitiny, nepřerušovaný řez
19 859	MK	Nejvýše namáhané hrubovací nástroje pro ocel a ocelolitinu
19 860	MKH	
19 861 (HS10-4-3-10)	Radeco M10	Jemné obrábění ocelí, úběr třísek velkého průřezu u materiálů s vysokou pevností

V moderní době se často využívá výroby nástrojů **práškovou metalurgií**. Tyto výrobky mají výhodu v rychlém tuhnutí atomizovaného prášku. Tím je omezena segregace a zaručena velmi jemná struktura s rovnoměrným rozložením karbidů. Zlepšení je také v houževnatosti, v rozměrové stálosti během tepelného zpracování i v řezných vlastnostech. Lze takto vyrobit více legované oceli než běžným tavícím způsobem. Nejrozšířenější způsob výroby práškovou metalurgií je ASP – Anti Segregation Process. Zástupci této kategorie jsou v tabulce 1.6 ¹⁷.

Tabulka 1.6 Složení HSS ocelí vyrobených práškovou metalurgií ⁴.

ASP	Složení						Tvrdost [HV]
	C	Cr	Mo	W	V	Co	
23	1,28	4,2	5,0	6,4	3,1	-	840–900
30	1,28	4,2	5,0	6,4	3,1	8,5	
60	2,30	4,0	7,0	6,5	6,5	10,5	

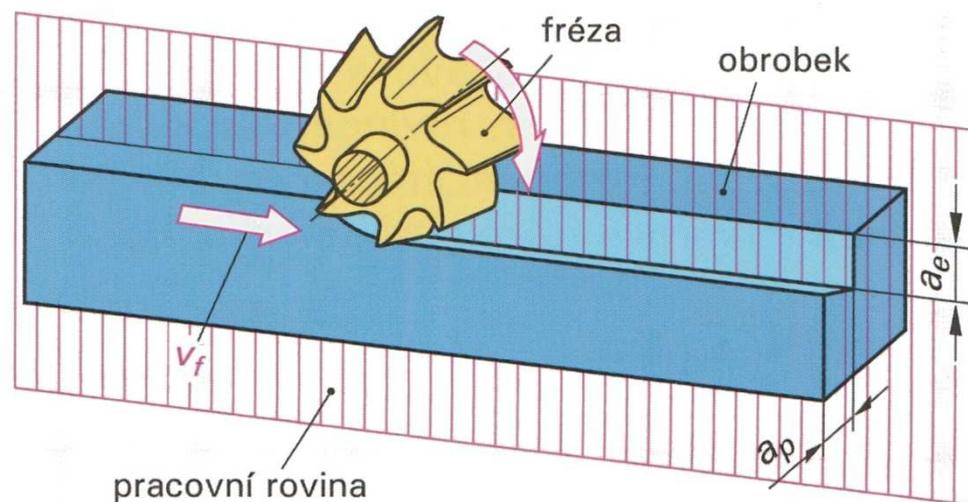
2 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je technologická operace, kdy dochází k úběru materiálu rotujícím nástrojem a pohybem obrobku. Oba pohyby jsou k sobě svázané a v dřívějších dobách byl posuv pouze přímočarý, avšak dnes lze díky moderním strojům měnit pohyby v libovolných směrech. Nástrojem je fréza, která má obvykle větší počet zubů, z nichž každý odebrává určité množství materiálu. Při procesu frézování přistupujeme s komplexním postupem, jelikož je třeba zohlednit mnoho faktorů, ovlivňujících řezný nástroj. Jsou to například: tvar obrobku, obráběcí stroj, materiál obrobku, náklady a podobně^{2, 4, 5, 16}.

Z technologického hlediska dělíme frézování, závisle na nástroji, na frézování čelní a válcové neboli obvodové. Od těchto základních typů jsou odvozeny i další způsoby jako například frézování okružní a planetové^{5, 16}.

2.1 Kinematika frézování

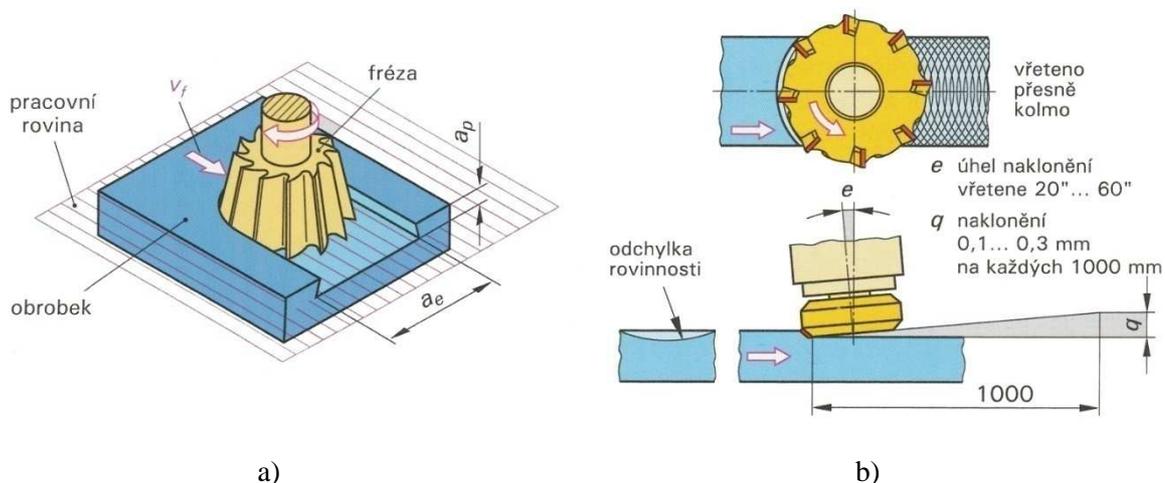
Válcové frézování je převážně uplatňováno při obrábění válcovými a tvarovými frézami. Zuby jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje (v jistých případech lze na tento typ frézování použít i nástroje čelní a stopkové). Šířka záběru ostří, ve starší literatuře hloubka řezu nebo hloubko odebírané vrstvy, se nastavuje kolmo na osu otáčení nástroje. Obrobená plocha je s osou nástroje rovnoběžná. Schéma válcového obrábění je na obrázku 2.1^{5, 16}.



Obrázek 2.1 Válcové frézování²

Čelní frézování je realizováno frézami čelními. Ty mají zuby jak na čele, tak po obvodu (válcové části). Vzhledem k pozici obrobku a ose frézy rozlišujeme frézování symetrické a nesymetrické. Šířka záběru ostří se nastavuje ve směru osy frézy a obrobená plocha je kolmá na osu nástroje^{4, 5, 16}.

U čelního frézování je důležité zmínit i vliv naklonění vřetene. To má zlepšit jakost povrchu a zabránit vzniku stop po břitech, které jsou mimo řez. Naklonění je v řádech minut. Obecně se udává vyklonění 0,1 milimetru na jeden metr délky. Lehce negativní je konkávní úchylka u povrchů, které jsou obráběny frézami s velkými průměry. Celý princip je znázorněn na obrázku 2.2a².



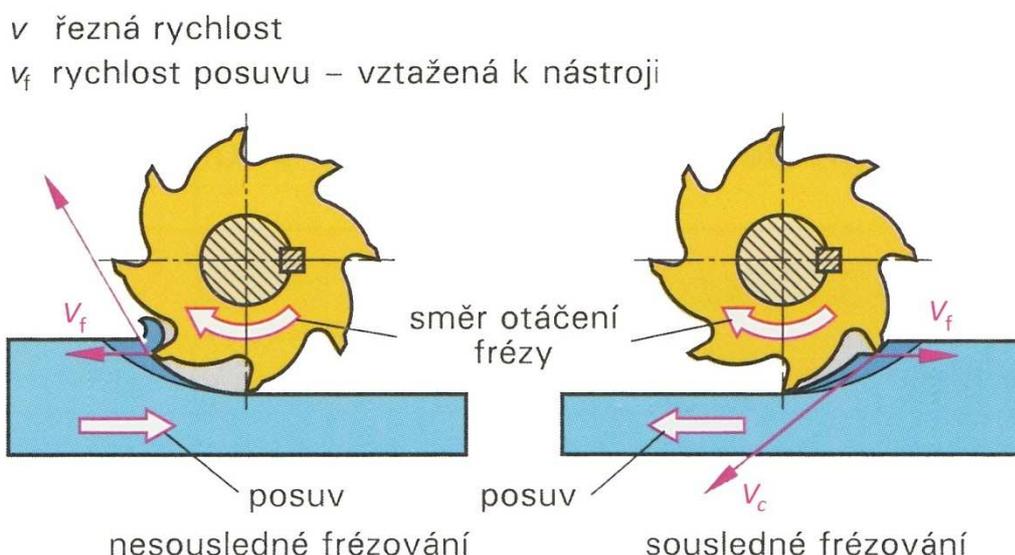
Obrázek 2.2 Čelní frézování²: a) čelní frézování a pracovní rovina, b) vyklonění vřetene.

2.1.1 Sousedné frézování

Smysl rotace je stejný jako směr posuvu obrobku. Tím maximální tloušťka třísky vznikne hned při vniknutí břitu do obrobku. Obrobená plocha vzniká, až když břit opouští obrobek. Řezné síly obvykle působí směrem do stolu obráběcího stroje. Při frézování čelní frézou je směr obrábění volen tak, aby síly působily do pevné čelisti svěráku. Sousedné frézování lze provozovat pouze na stroji, který má vymezené vůle mezi maticí stolu a posuvovým šroubem. Pokud je ve stroji nějaká vůle může dojít k nerovnoměrnému posuvu a tím i možnému poškození či zničení nástroje, popřípadě i stroje. Výhodami sousledné metody je vyšší trvanlivost břitů, menší potřebný řezný výkon, možnost použití jednodušších upínacích prvků, snížená náchylnost ke chvění, obvykle se netvoří nárůstek a obrobená plocha je vyšších jakostí^{4, 5, 16}.

2.1.2 Nesousledné frézování

Jak už název napovídá u nesousledného frézování je smysl rotace opačný proti pohybu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání břitu do materiálu obrobku a tloušťka třísky postupně roste z nulové hodnoty na maximální šíři. K oddělení třísky dochází po určitém skluzu břitu po ploše, kterou vytvořil předchozí zub. Vznikající silové účinky mají vliv na výraznější opotřebení břitu. Řezná síla působí směrem od obrobku a vytahuje ho tak z upnutí. Přednosti nesousledného frézování jsou vyšší trvanlivost nástroje při frézování odlitků a ploch s velkým množstvím nečistot na povrchu. Namáhání stroje je menší a není nutné vymezovat vůle jako u sousledného frézování^{4, 5}.

Obrázek 2.3 Porovnání sousledného a nesousledného frézování².

2.1.3 Pohyby a rychlosti

Jeden z hlavních faktorů při obrábění je vhodnost řezných podmínek. Ta se odvíjí podle druhu technologické operace, typu stroje a nástroje, obrobku a zejména od požadované přesnosti obrábění a parametrů k tomu vztažených²⁰.

Základními podmínkami jsou řezná rychlost v_c , posuvová rychlost v_f (ta je dána posuvem na zub f_z a otáčkami n) a šířka záběru hlavního ostří a_p ^{4, 17, 20}.

Hlavní pohyb (rotační) vykonává nástroj a pro zjednodušení se považuje za řeznou rychlost obvodová rychlost nástroje. Ta se vypočítá ze vztahu 2.1 kde D [mm] je průměr frézy a n [min^{-1}] jsou otáčky nástroje^{2, 17}.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \quad (2.1)$$

Posuvová rychlost je přímo úměrná rychlosti mezi osou nástroje a obrobkem. Z toho plyne, že je rovna rychlosti posuvu stolu frézy nebo rychlosti pohybu vřeteníku. Výpočet je ze vztahu 2.2, kde z vyjadřuje počet zubů nástroje^{4, 16}.

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \quad (2.2)$$

U konvenčních stolů lze nastavit posuvovou rychlost pouze z předvolené řady a následný přepočet na hodnotu f_z je následující^{4, 16}:

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \text{ [mm]} \quad (2.3)$$

2.2 Analýza průřezu třísky

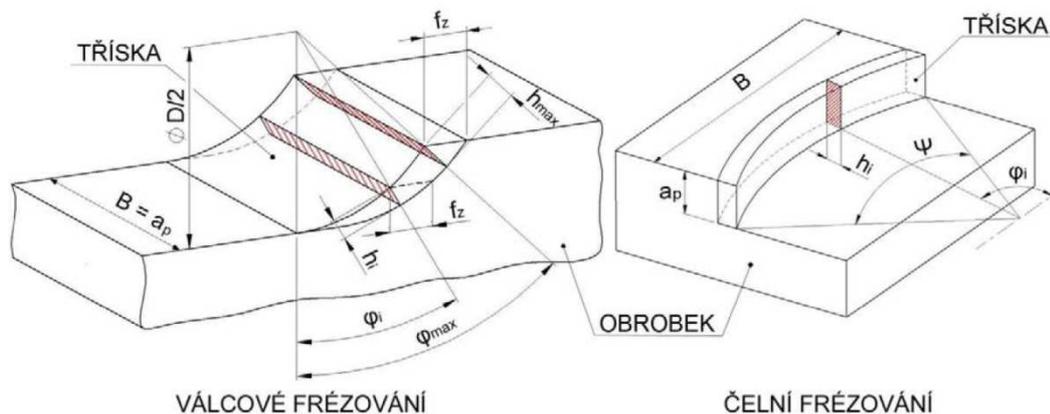
Při řešení průřezu třísky je nutno brát v potaz její nerovnoměrnou tloušťku a proto i silové působení na břit nástroje není konstantní. V současném záběru se naráz nachází minimálně jeden a více břitů. Tříška je také vždy dělená periodickým záběrem břitů.

Šířka záběru ostří a_p určuje jako jeden z parametrů velikost třísky a tím i objem odebraného materiálu. Při čelním frézování je a_p nastavováno v axiálním směru, naopak při válcovém frézování se jedná o radiální hodnotu nastavení frézy. Druhý parametr je tloušťka h_i . Z těchto dvou parametrů lze podle vztahu 2.4 pro válcové frézování a vztahu 2.5 pro čelní frézování určit průřez třísky^{4, 16}.

$$h_{D \max} = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_{\max} \text{ [mm]} \quad (2.4)$$

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_{\max} \text{ [mm]} \quad (2.5)$$

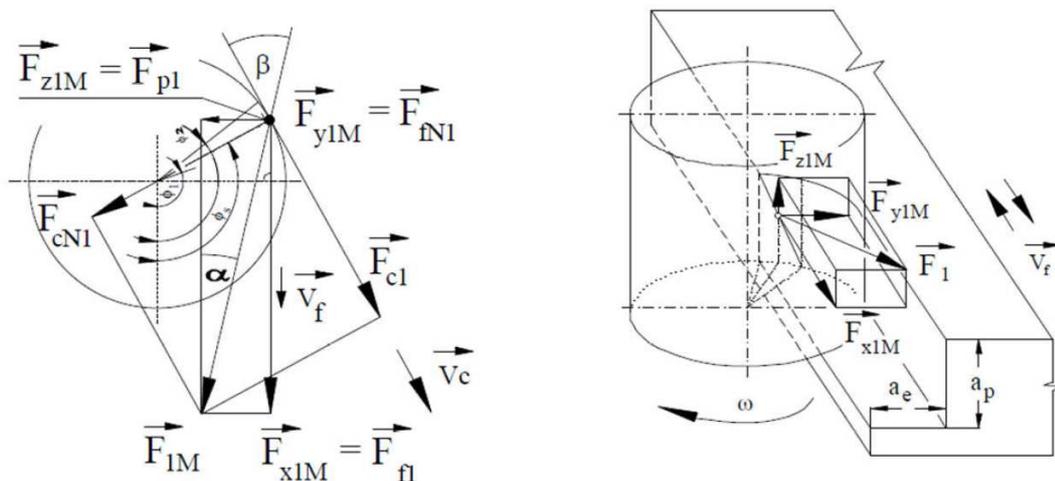
Tloušťka třísky, která je odebírána válcovým nesousledným frézováním se mění od nulové hodnoty po maximální tloušťku h_{\max} . Naopak tomu je při sousledném frézování kdy jde tloušťka z maxima k nulové hodnotě. Vzhled třísky s popisky je na obrázku 2.4^{4, 16, 17}.



Obrázek 2.4 Vzhled a parametry třísky²⁰.

2.3 Silové působení

Při specifikaci se vychází ze silových poměrů na jednom zubu frézy. Ten se nachází v poloze určené úhlem φ_i . U válcového frézování s přímými zuby se celková síla F , které působí na břit, rozkládá na složky F_c a F_{cN} , respektive na složky F_f a F_{fN} ^{4, 16}.



Obrázek 2.5 Silové zatížení při čelním frézování⁴.

Řezná síla F_{ci} se vyjádří jako součin měrné řezné síly k_{ci} a jmenovitého průřezu třísky A_{Di} (vztah 2.5) ⁴:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_i \text{ [N]} \quad (2.6)$$

Měrná řezná síla se vypočte na základě vztahu 2.7 z konstant obráběného materiálu ⁴.

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin\varphi_i)^{1-x}} \quad (2.7)$$

Po dosazení vztahu 2.7 do 2.6 vyjádříme vztah pro výpočet řezné síly pro válčové frézování ^{4,16}:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x\varphi_i \text{ [N]} \quad (2.8)$$

Při čelním frézování je to obdobné. Měrná řezná síla k_{ci} se spočítá následovně ⁴:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin\kappa_r \cdot \sin\varphi_i)^{1-x}} \quad (2.9)$$

Dosazením vztahu 2.9 do 2.6 získáme vztah pro výpočet řezné síly pro čelní frézování ^{4,16}.

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)\kappa_r} \cdot \sin^x\varphi_i \text{ [N]} \quad (2.8)$$

U vícebřitých fréz (3 a více) je v záběru několik zubů najednou. Proto výsledná řezná síla závisí na okamžité poloze zubů vzhledem k obrobku. Výsledná síla pro čelní frézování se vypočítá ze vztahu 5.7 ¹⁶.

V průběhu frézování se silové účinky mění podle stavu opotřebení nástroje. To je dáno změnou geometrie. Obvykle je tento jev nejpatrnější u nástrojů se zuby do šroubovice. Nový nástroj je díky pozitivní geometrii (na čele nástroje) vtahován do řezu. Opotřebená fréza je naopak od obrobku odtlačována ⁴.

Měření sil je prováděno metodou **přímou** nebo **nepřímou**. Nepřímá metoda vychází z rozdílů výkonu a příkonu stroje. Při měření se využívá měřicí aparatury. Takto je vypočtena celková hodnota síly, nelze však určit její směr. Přímá metoda využívá piezoelektrické dynamometry nebo tenzometry. Měří se reakce obrobku na proces řezání, která je dále transformována na síly působící na nástroj ²¹.

Díky měření řezných sil v průběhu obrábění lze kvantifikovat i velikost opotřebení nástroje. Piezoelektrické měření je však finančně a časově náročné, ale na jejich základě lze, jako v experimentu této práce, hodnotit vliv povlaků a další vlivy při obrábění ⁴.

3 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ

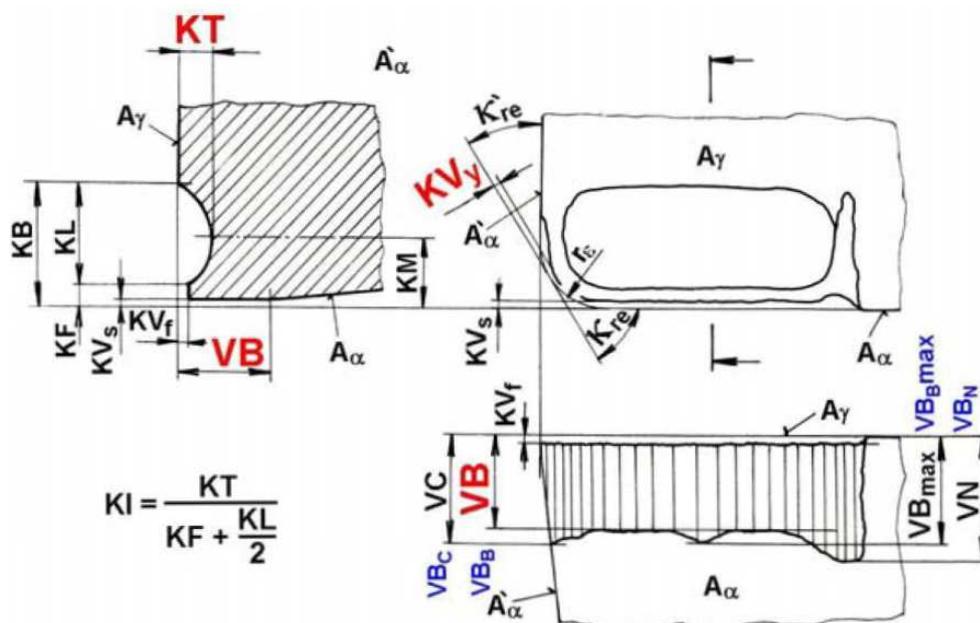
Běžným důsledkem funkce všech strojních součástí je opotřebení. Jedná se o součásti, které jsou v relativním pohybu a ve vzájemném silovém kontaktu. Při řezném procesu dochází k relativnímu pohybu nástroj – obrobek a nástroj – tříška. Dochází i ke kontaktu nástroje s obrobkem na hlavním i vedlejším hřbetě a špičce nástroje. Proces opotřebení je složitý děj, jenž závisí na několika faktorech. Základní kategorie opotřebení břitů jsou fyzikálně–mechanické a chemické. Do první kategorie lze zařadit^{2, 4, 17}:

- křehký lom,
- plastická deformace,
- abraze,
- difuze,
- adheze,
- oxidace.

Mezi chemické mechanismy lze zařadit difúzi, oxidaci, termoelektrické opotřebení a kombinaci všech uvedených mechanismů⁴.

Abrazi způsobuje ořez (brusný) vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu a částic uvolněných z nástroje. **Adheze** se projevuje vznikem mikrosvarů na vrcholcích nerovností čela nástroje a třísky. Díky vysokým teplotám, tlakům a rychlostem dojde ke svaru a rychlému odtržení. Migrace atomů mezi materiály v kontaktu je **difuze**. Přítomnost kyslíku v okolním prostředí řezu má za následek **oxidaci**. Takto označujeme vznik nežádoucích chemických sloučenin na povrchu nástroje. **Plastickou deformací** rozumíme důsledek velkého tepelného a mechanického zatížení nástroje v dlouhém časovém horizontu. **Křehký lom** vznikne velkým mechanickým zatížením nástroje^{4, 17}.

Opotřebení se měří metodou přímou a nepřímou. Mezi přímé metody lze zařadit vzdálenostní měření vybraného kritéria: **VB**, **KT**, **KV_y**, vážení břitové destičky a odečítání úbytku váhy nebo jiné elektrické metody. Mezi nepřímé metody patří měření a vyhodnocování sil při řezném procesu, odečítání příkonu na vřetení, měření teplot v řezu nebo měření kmitání soustavy stroj–nástroj–obrobek (S–N–O)⁴.



Obrázek 3.1 Kritéria opotřebení³⁸.

Nejpoužívanější metodou (metoda je použita i v experimentální části diplomové práce) je měření kritéria **VB** – šířky fazetky. Často se též používá měření výmolu na čele **KT** nebo radiální opotřebení špičky **KV_y**. U měření je důležité, aby jej prováděla vždy jedna a ta stejná osoba. Každý má při měření trochu jiný úhel pohledu a pro srovnatelnost hodnot je tedy třeba stejného autora měření⁴.

Opatření při problémech při frézování										
problémy s opotřebením nástroje					všeobecné problémy					opatření k odstranění problémů
prasknutí destičky	vylamování hran	extrémní opotřebení hřbetu	extrémní vymílání	tvorba nárůstku	třísky: tvar, odvádění	chvění, vibrace	špatná jakost povrchu	otřepy a vylamování hran	přetížení stroje	
	●			●				●		zvýšit řeznou rychlost v
		●	●							snížit řeznou rychlost v
		●		●						zvětšit posuv na zub f_z
●	●		●					●	●	zmenšit posuv na zub f_z
								●	●	zmenšit hloubku řezu
		●	●							zvolit druh SK odolnější proti opotřebením
●	●									zvolit houževnatější druh SK
●	●			●	●	●		●	●	zvolit frézu nebo destičky s jinou geometrií
●					●					zvolit frézu s větším prostorem pro třísky
							●	●		zkontrolovat šířku ploché fasety (široká hladicí faseta)
	●	●								rozšířit fasetu břitu
								●		zvolit menší úhel nastavení α
							●	●		zkontrolovat upnutí nástroje
●	●						●	●		zvýšit tuhost (stroj, nástroj, obrobek)
							●	●		zkontrolovat čelní a obvodové házení břitů

Obrázek 3.2 Opatření při problémech během frézování².

4 CHARAKTERISTIKA POVLAKOVACÍCH METOD

Povlaky jsou nanášeny na řezné nástroje, aby zlepšily jejich mechanické vlastnosti. Díky lepším mechanickým vlastnostem lze při obrábění dosáhnout vyšších řezných rychlostí a životnosti nástroje. Největší pozornost je z hlediska mechanických vlastností věnována tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Typy opotřebení jsou rozebrány v předchozí kapitole. Nanášené povlaky mají v dnešní době tloušťku v jednotkách mikrometrů^{2, 19}.

4.1 Povlakovací metody

Povlakovací metoda **PVD (Physical Vapour Deposition)** je založena na fyzikálním napařování povlaku na nástroj. Je charakteristická nízkou pracovní teplotou okolo 500°C a původně byla vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí. Nízká teplota zaručuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění HSS nástroje a zhoršení jeho mechanických vlastností. V poslední době se PVD metoda rozšiřuje svými aplikacemi i pro slinuté karbidy. Povlak je nejčastěji vytvářen napařováním (evaporation), které je přímé, reaktivní nebo s asistencí iontového paprsku. Další metoda nanášení je naprašování (sputtering), které využívá doutnavého výboje nebo iontového paprsku^{19, 20, 22}.

Povlaky vytvořené technologií **CVD (Chemical Vapour Deposition)** vznikají za vysokých teplot 1 000–1 200 °C. Je to hlavní metoda pro povlakování slinutých karbidů. Lze ji realizovat ve čtyřech variantách: tepelně indukovaná, plazmaticky aktivovaná, elektronově indukovaná (paprsek elektronu), fotonově indukovaná (například laserem). Metoda je založena na reakci chemických sloučenin v plynném skupenství v plazmě, která se tvoří v těsné blízkosti podkladového materiálu a následnému uložení na něm^{19, 23, 24}.

Tabulka 4.1 Porovnání metod CVD a PVD¹⁹.

Charakteristika	PVD	CVD
Mechanismus tvorby povlaku	Tepelná energie, přenos pohybové energie	Chemická reakce
Teplota povlakování	< 500 °C	700 – 1 200 °C
Primární určení	HSS	SK
První materiál povlaku	TiN	TiC
Tloušťka povlaku	2–4 μm	5–10 μm
Rychlost povlakování	vysoká	Střední
Povlakování ostrých hran	ano	Obtížné
Deponované částice	Atomy, ionty	Atomy
Zbytková napětí v povlaku	tlaková	Tahová
Energetická náročnost	nízká	Vysoká
Negativní vliv na okolní prostředí	ne	ano

Metoda CVD je podrobně rozebrána v literaturách 19, 23 a 24.

4.2 PVD fyzikální metoda

Povlaky vznikají kondenzací atomů nebo jejich shluku za sníženého tlaku okolo 1Pa. Částice jsou uvolňovány z jejich zdroje (terčů, targetů) fyzikálními metodami (odpařováním nebo naprašováním). Částice, které se uvolní, reagují s atmosférou pracovní komory, kterou tvoří inertní a neinertní plyn, dále jsou záporným předpětím urychlovány k povrchu substrátu. Na něm se usazují ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku¹⁹.

Dopadající atomy vytváří vrstvu povlaku. Na povrchu povlakované součásti jsou nejdříve zachyceny procesy sorpce (chemické nebo fyzikální), dále jsou zachyceny trvalou vazbou nebo jsou uvolněny. Další atomy, které dopadají na povrch, se pomocí pohyblivosti po povrchu mohou spojit vazbou s již dříve zachycenými atomy. Postupně se tak vytvářejí izolované zárodky a ostrůvky rostoucí vrstvy. Růst trvá do doby, kdy dojde ke spojení v souvislou vrstvu homogenního povlaku¹⁹.

Hlavní nevýhodou všech PVD metod je složitý vakuový systém a požadavek na možnost pohybu povlakovaných předmětů (rotační držáky apod.). Pohyb předmětů je nutný pro rovnoměrné rozložení povlaku po celém jejich povrchu. Metoda PVD však na rozdíl od jiných metod dokáže napovlakovat i ostré hrany^{19, 22}.

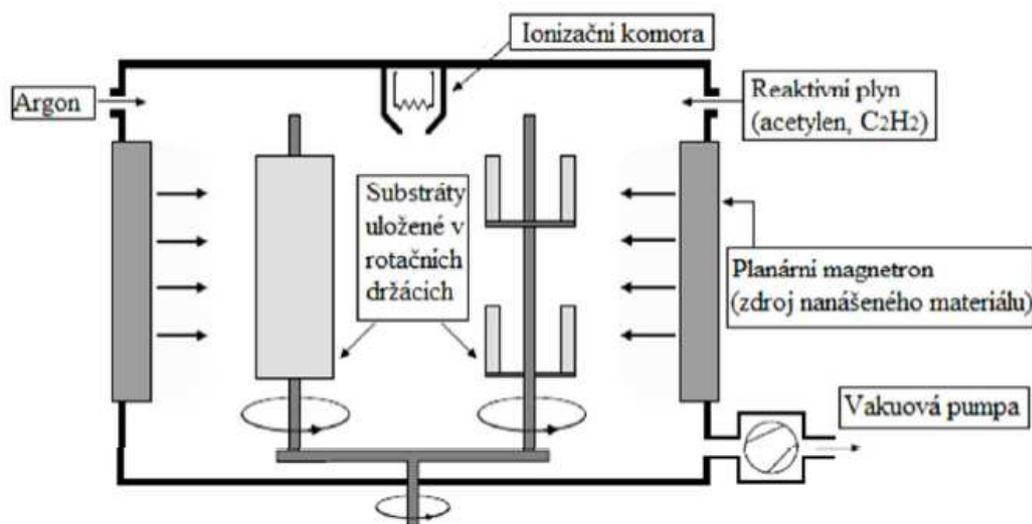
Pro nanášení PVD povlaků na nástroje z rychlořezných ocelí se obvykle používají dvě základní operace: Magnetronové naprašování a obloukové odpařování²².

4.2.1 Naprašování

Jednou z nejjednodušších metod nanesení PVD povlaku je naprašování. Probíhá ve vakuu nebo při tlaku nižším než 0,7 Pa. Odprášené částice se dostávají na povrch substrátu bez kolize s molekulami plynu, který je v prostoru mezi substrátem a zdrojem. Takto lze vytvářet tenké povlaky z obtížně tavitelných materiálů bez požadavku ohřevu targetů (zdrojů) na vysokou teplotu, která je nutná při odpařovacím procesu. Lze povlakovat i při tlaku 0,7–2,0 Pa, při vyšším tlaku, kdy odprášené nebo odražené částice jsou ohřívány srážkami z plynu předtím, než se dostanou na povrch substrátu¹⁹.

Zařízení pro naprašování se skládá s katodického targetu, který je vyrobený z materiálu naprašovaného na nástroj, odpařovacího plynu, držáku substrátu, vakuové komory, čerpacího systému a zdroje energie. Elektricky vytvořený doutnavý výboj hoří ve zředěném inertním plynu (nejčastěji argon) ve vakuové komoře. Nad záporně nabitým targetem se díky výboji udržuje argonová plazma a její kladné ionty jsou elektrickým polem urychleny na target a při dopadu se díky jejich pohybové energii odpařují jednotlivé atomy nebo molekuly²².

Nejjednodušší systém naprašování je naprašování doutnavým výbojem rovinné elektrody (Planar Diode Glow Discharge Sputter Deposition)²⁵ Tato je oblíbená pro jednoduchost a možnost výroby terče z různých materiálů, mezi nevýhody patří pomalá rychlost depozice. Radiofrekvenční naprašování umožňuje depozici povlaku z terčů, které jsou nevodivé. Naprašování pomocí iontového paprsku má za výhodu výbornou adhezi povlaku na substrát a vysokou čistotu nanášeného povlaku. Účinnost ionizace poblíž targetu lze u diodového procesu zvýšit magnetickým polem. U běžných rovinných diod jsou ionty generovány relativně daleko od zdroje a tím se zvyšuje pravděpodobnost ztráty energie vůči stěnám komory. Schéma magnetronového naprašování je na obrázku 4.1. Tato metoda zajišťuje vysokou proudovou hustotu při nízkém napětí a hlavně vysokou intenzitu naprašování. Proto je metoda **magnetronového naprašování** nejpoužívanější^{19, 22}.

Obrázek 4.1 Magnetronové napařování ¹⁹.Tabulka 4.2 Výhody a nevýhody napařování ²².

Výhody	Nevýhody
Target je stabilním zdrojem par	Velké vnitřní pnutí v povlaku
Vysoká životnost targetu	Cena targetů
Target i substrát mohou být blízko sebe	Špatné využití materiálu
Variabilita uspořádání	Nízká intenzita depozice
Nízké zatížení tepelnou radiací	Nutnost chlazení targetu
Lze napařovat a ukládat prvky, slitiny a chemické sloučeniny	Nutnost rotačního držáku pro rovnoměrnost povlaku

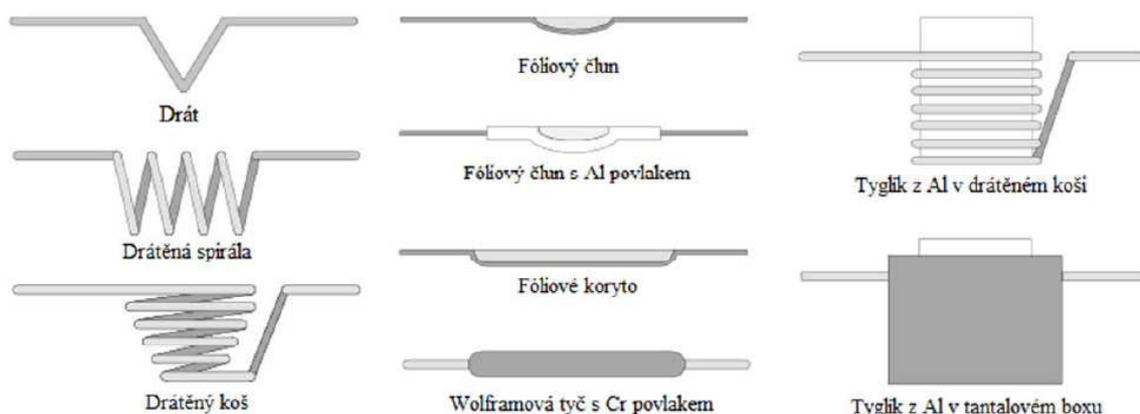
4.2.2 Napařování

V napařovacích procesech je materiál odpařován z terčů, které jsou ohřívány různými způsoby. Substrát lze ohřívat nebo připojit na požadované předpětí střídavého či stejnosměrného napájení. Proces probíhá ve vakuu za tlaku od 10^{-3} – 10^{-8} Pa. Při těchto tlacích je volná střední dráha v porovnání se vzdáleností target – substrát velmi velká. Pohybuje v hodnotách 10^2 až 10^7 cm. Odpařené atomy se pohybují v nekolizních drahách a na substrátu tak dochází k vytvoření rovnoměrné vrstvy povlaku. Do komory je obvykle přiváděn interní plyn (obvykle Ar), aby střední volná dráha byla kratší. Tlak plynu je 0,7–26,7 Pa, takže odpařené složky během dráhy prodělají několikanásobné srážky, díky kterým je vytvořen rovnoměrný povlak ^{19, 22}.

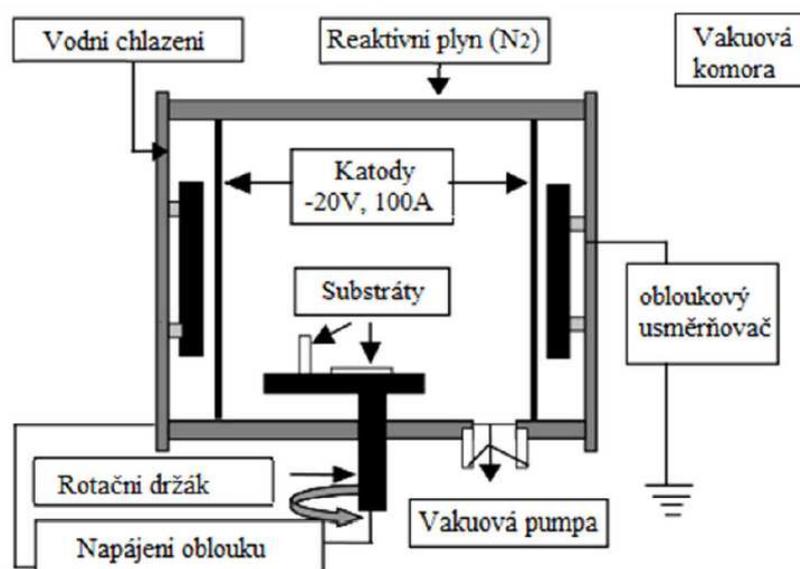
Odpařovací zdroje jsou rozlišovány dle způsobu ohřevu pro změnu skupenství pevné nebo kapalně fáze do plynné fáze. Nejjednodušší jsou odporové zdroje. Ty využívají vyhřívané kovové dráty a folie, které jsou dostupné v různých tvarech a velikostech viz obrázek 4.2. Obvykle jsou z kovových materiálů s vysokou teplotou tavení a nízkým tlakem par. Například wolfram a molybden tyto požadavky splňují. Díky těmto vlastnostem nekontaminují nově vznikající povlak ^{19, 22}.

Nejpoužívanější je systém **obloukového napařování** (cathodic arc evaporation – CAE). Nanášený materiál je odpařován nízkonapěťovým elektrickým obloukem za specifických podmínek hoření oblouku při nízkém tlaku. Na anodě, kterou tvoří vakuová komora, hoří oblouk po celé její ploše, kdežto na katodě (targetu) oblouk hoří pouze bodově. Místo

hoření oblouku má průměr asi $20 \mu\text{m}$. Tato katodová skvrna se po povrchu terče pohybuje rychlostí až $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Teplota v místě skvrny dosahuje teplot mezi $10\,000$ až $20\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ a tím je zaručeno odpaření prakticky libovolného elektricky vodivého materiálu. Pohyb skvrny lze řídit magnetickým polem a lze tak řízeně odpařovat materiál^{19, 22}.



Obrázek 4.2 Odporově vyhřívané terče¹⁹.



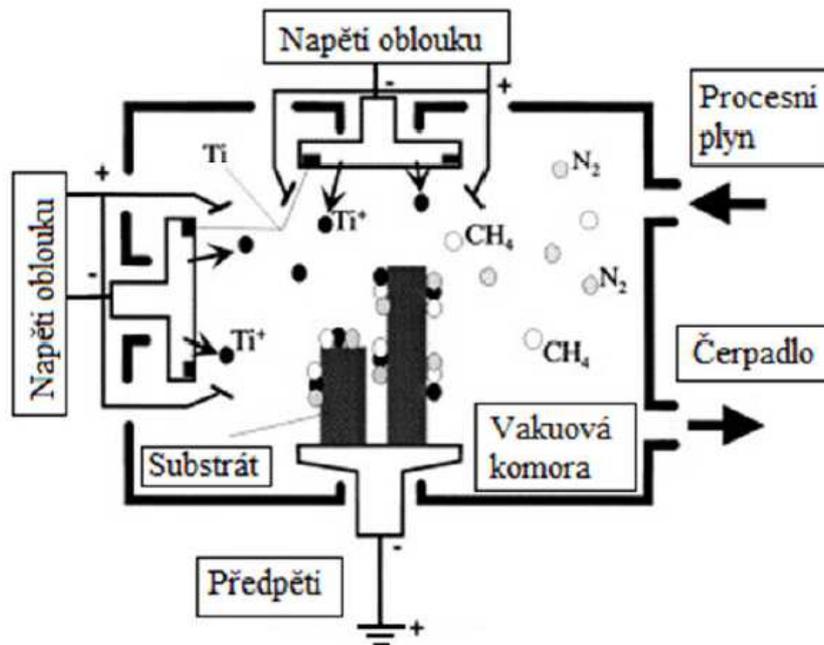
Obrázek4.3 Schéma obloukového napařování¹⁹.

Tabulka 4.3 Porovnání výhod a nevýhod oblouk napařování¹⁹.

Výhody	Nevýhody
Nízké zatížení tepelnou radiací	Odpařovaný materiál musí být elektricky vodivý
Možnost odpaření všech elektricky vodivých materiálů	Roztavené makročástice z katody se mohou dostat na povrch povlaku a tvořit kuličky
Variabilní uspořádání katody	
Efektivní ionizace odpařovaného materiálu i reaktivních plynů	
Menší znečištění terče proti jiným metodám	
Možnost urychlení iontů na vysokou energii	
Aktivace reaktivních plynů plazmou	

4.2.3 Iontová implementace

Tato metoda je kombinací napařování a napařování. Je to hybridní proces, kde je povrch substrátu bombardován svazkou částic s vysokou energií. Schéma je na obrázku 4.4. Zdrojem deponovaných složek může být odprašování, odpařování, plyny nebo páry. Mezi substrátem, který je katodou se záporným potenciálem, a terčem vzniká silné elektrické pole od 50 do 1 000 V. Dochází tak k elektrickému výboji v plynné atmosféře. Výboj tak ionizuje částice plynu i odpařené částice čistého kovu. Reakcí iontů vznikne povlak, který se usazuje na povlakovaných předmětech^{19, 22}.



Obrázek 4.4 Schéma iontové implementace¹⁹.

Tabulka 4.4 Porovnání kladů a záporů iontové implementace¹⁹.

Výhody	Nevýhody
Velké množství energie do povlaku	Mnoho řízených parametrů
Rovnoměrný průběh procesu	Obtížné docílení rovnoměrného bombardování
Možnost řízeného bombardování	Možnost nadměrného ohřevu substrátu
Přesné chemické složení povlaku	Možnost zůstatku plynu v povlaku
Vlastnosti povlaku jsou méně závislé na úhlu dopadu materiálu	Možnost zbytkových nadměrných lakových pnutí v povlaku
Široký rozsah povlakovaných materiálů i povlaků	

4.3 Příprava nástrojů z HSS před povlakováním

Nástroje je třeba před nanášením povlaků upravit, aby přilnavost byla co největší. Kvalita břitů a ploch upravených broušením je parametr, který nejvíce ovlivňuje adhezi povlaku na nástroj. Pokud jsou na nástroji vidět výrazné stopy po broušení, dochází tak k odlupování vrstvy. Tyto nerovnosti se u HSS nástrojů odstraňují kartáčováním nebo jiným ručním odjehlením. Dále lze stopám předejít volbou vhodného brusného kotouče^{26, 27}.

Druhým krokem před povlakováním je odmaštění. Odmašťovačla jsou na bázi ropných derivátů a vlastní proces probíhá v zařízeních dle velikosti a množství nástrojů²⁶.

Mokrě čištění se provádí kombinovanými metodami s využitím oplachů, elektrochemických metod, ultrazvuku, vakuového sušení nebo odpařování těkavých látek. Proces probíhá v mycích linkách, které mají několik samostatných mycích a oplachovacích van. Nejpoužívanějším čisticím roztokem je roztok hydroxidu sodného (NaOH) a pro zvýšení účinku se využívá malé množství smáčedel nebo kyseliny citrónové. Po čištění se předměty oplachují a zbavují zbytků čisticích roztoků. Zároveň oplachy zajišťují ochranu povrchů proti korozi. Pro rychlé sušení a povrch bez map se využívá odpařování na vzduchu nebo ve vakuu²⁶.

Pevně přilnuté částice se odstraňují pískováním. Jako medium je použit karbid křemíku (SiC) nebo oxid hlinitý (Al_2O_3) se zrnitostí 20–100 μm ^{26,27}.

Adhezi na funkčních plochách lze také zlepšit omíláním v granulátech. Nástrojem je nuceně pohybováno v nádobě s granulátem a vzájemným pohybem a omíláním se vyhlazují nerovnosti po broušení. Obvykle se používá po nevhodném broušení, tedy za zvolení špatných rezných podmínek, materiálu, atd.^{26,27}.



Obrázek 4.5 Upravený břit před povlakováním²⁷.

U renovace nástrojů se původní povlaky odstraňují takzvaným strippingem. Je prováděn chemickou a elektrochemickou cestou, kdy se využívá silných oxidačních činidel. Nejčastěji je to roztok obsahující peroxid vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu ohřátý na 70 °C. Po strippingu je nutné nástroje opláchnout. Nevýhodou technologie je odleptávání kobaltu. To je tedy nebezpečné zejména pro slinuté karbidy, ale zároveň i pro kobaltové rychlořezné oceli. Například nástroje z HSS Co5 nebo HSS Co8 obsahují 5 respektive 8 hmotnostních procent kobaltu. Touto metodou lze odstraňovat povlaky na bázi titanu (TiN , Ti(C,N) (Al,Ti) N , atd., ale i povlaky s obsahem chromu (CrN , (Cr,Al) N , a další)^{26,28}.



Obrázek 4.5 Stripping²⁸.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola je zaměřena na popis stroje, nástroje, obrobků, průběhu experimentu a zpracování naměřených výsledků. Test proběhl v dílnách Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně.

5.1 Obráběcí stroj

Vertikální frézka TOS Kuřim FB 32V (obrázek 5.1) je tuhý stroj na litinovém rámu. Frézka není vybavena digitálním odměřováním a řídicím systémem, takže veškerá nastavení rezných podmínek i polohy jsou nastavovány manuálně. Parametry FB 32V jsou uvedeny v tabulce 5.1. Pohyby pracovního stolu, rozběhy a zastavování vřetene lze ovládat ze závěrného ovladače, který je na otočném rameni.



Obrázek 5.1 Frézka FB 32V

Tabulka 5.1 Technické parametry frézky FB 32V ²⁹.

Technické parametry FB 32V	
Otáčky vřetene	28–1 400 min ⁻¹
Elektromotor vřetene	10 kW
Elektromotor stroje	2,2 kW
Rozměr stolu	450 x 1 400 mm
Posuv podélný a příčný	10–2 000 mm.min ⁻¹
Posuv svislý	2,5–500 mm.min ⁻¹
Hmotnost stroje	3 800 kg
Půdorysná plocha stroje	2 980 x 2 130 mm

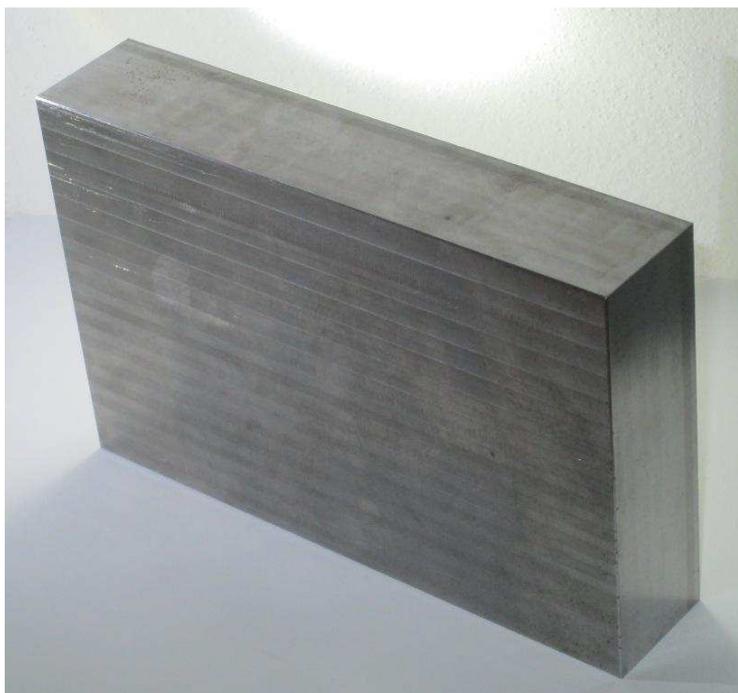
5.2 Obráběný materiál

Zkušební vzorky jsou z materiálu 19 312 podle značení ČSN, dle ISO a DIN 90MnCrV8, 1.2842. Ocel nese obchodní označení STABIL, proto je hovorově označována jako „stabilka“. Jedná se o nástrojovou mangan-chrom-vanadovou ocel vhodnou pro práci za studena se střední prokalitelností. Materiál je vhodný pro použití na střížné nástroje, ohýbací nástroje, malé formy pro tváření plastů nebo pro měřidla a kalibry. Dodavatelem materiálu pro tento experiment je slovinská firma METAL RAVNE d.o.o. Materiál byl dodán ve stavu žíhaném naměkko s tvrdostí 180–190 HB. Celý blok byl po dokončení tepelného zpracování kontrolován ultrazvukem a protokol o inspekci je k dispozici v příloze 1. Chemické složení dané tavby je v tabulce 5.2 a stejně jako v kapitole 1 jsou jednotkou hmotnostní procenta^{30, 31}.

Tabulka 5.2 Chemické složení 1.2842 [hm %].

C	Si	Mn	P	S	Cr	V
0,89	0,22	1,92	0,019	0,006	0,34	0,08

Testovací těleso bylo ve společnosti IMS Drašnar s.r.o. obrobena na rozměry 150 x 80 ±0,1 x 30 [mm] v počtu 4 kusů. Rozměr 80 mm byla zvolena přísnější tolerance kvůli stejným délkám drah nástroje při experimentu.



Obrázek 5.2 Testovací vzorek.

5.3 Obráběcí nástroje

Pro experiment byly vybrány čtyři nástroje stejných rozměrů s různými povlaky. Výrobce nepovlakovaných nástrojů je zlínská firma ZPS – Frézovací nástroje a.s., která vznikla v roce 1992, avšak její historie sahá až do 30. let 20. století³².



140418

Rychlořezná ocel HSS Co8

DIN 844K

DIN
1835B $\lambda=40^\circ$
 $\gamma=12^\circ$ typ
NHSS
Co8

Obrázek 5.3 Nepovlakovaná fréza pro experiment ³³.

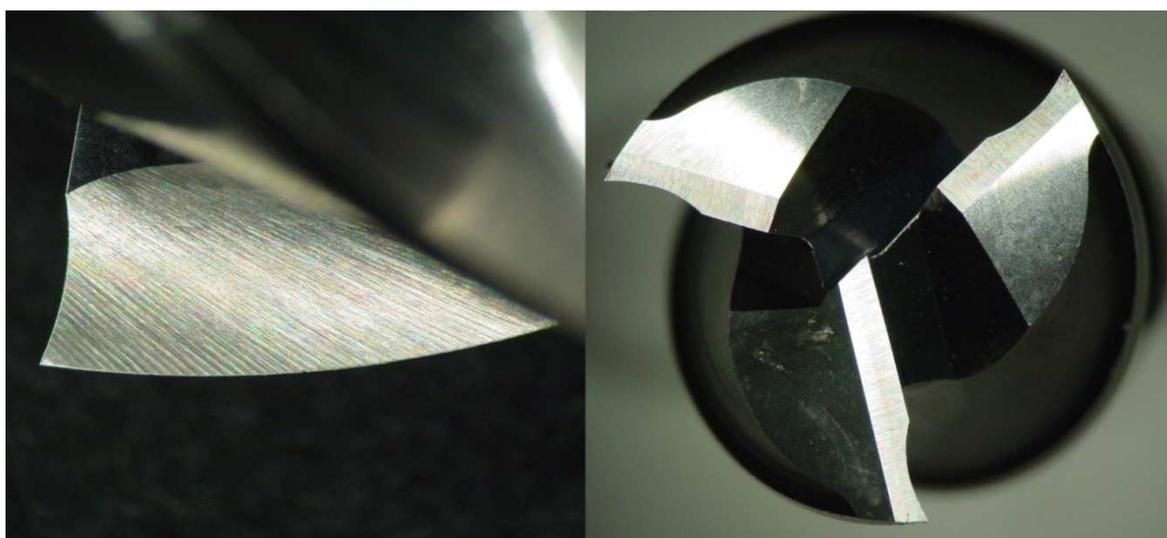
Nástrojem je fréza o průměru $D = 18\text{mm}$ s délkou řezné části 32 mm a celkovou délkou 92 mm. Průměr díčku pro upínání je 16 mm v toleranci h6 s ploškou weldon (DIN 1835B). Počet břitů (zubů) z je 3, přičemž jeden z břitů je přes střed nástroje, a tím je možné použít nástroj i k zavrtání ³³.

Materiál nástroje je kobaltová rychlořezná ocel HSS Co8 s dobrou houževnatostí a dobrou tepelnou odolností. Tato ocel je vhodná pro frézování pevných materiálů ³³.

Nástroje byly celkem čtyři, z nichž tři byly deponovány povlaky firmy Liss a.s. Firma Liss a.s. je členem švýcarské skupiny B.I.C group a kromě PVD povlaků nabízí i galvanické pokovování a výrobu hodinářských komponentů ³⁴.

5.3.1 Nepovlakovaný nástroj (A)

Před testováním byly pořízeny fotografie detailů jednotlivých břitů. Ty jsou na obrázku 5.4.



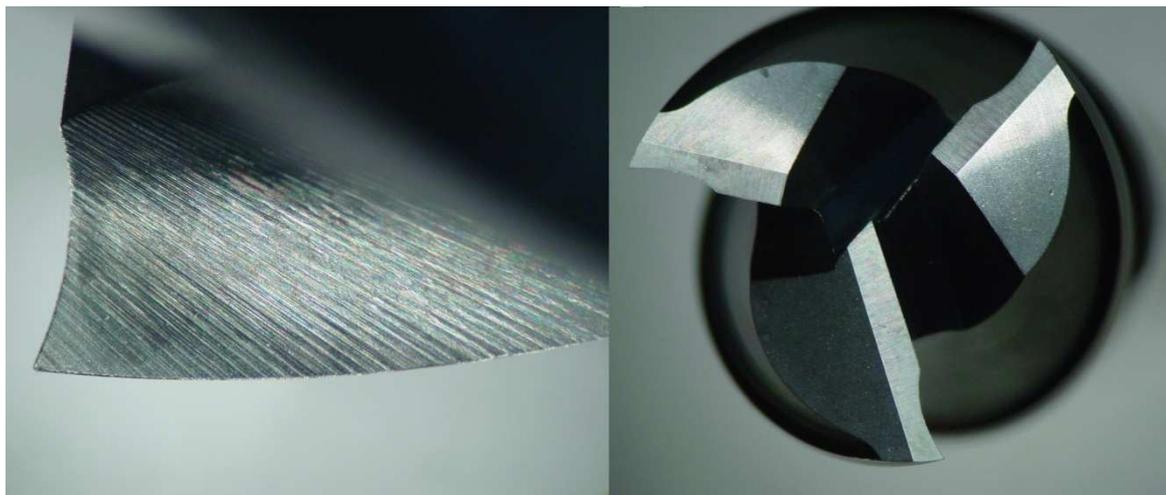
Obrázek 5.4 Nástroj bez povlaku (A)

5.3.2 Povlakovaný nástroj – povlak nACo® (B)

Druhým nástrojem pro test byla fréza s nanokompozitním povlakem (nc-ALTiN)/(a-Si3N4), který se vyznačuje vysokou tvrdostí a teplotní odolností. Tento typ povlaku je vhodný pro frézování kalených ocelí a obrábění bez využití procesních kapalin³⁵.

Tabulka 5.3 Technické parametry povlaku nACo®³⁵.

Barva	Maximální teplota použití	Tvrdost	Koeficient tření (ocel)	Tloušťka povlaku	Teplota depozice
fialovomodrá	1 200 °C	45 GPa	0,45	1–4 μm	480 °C



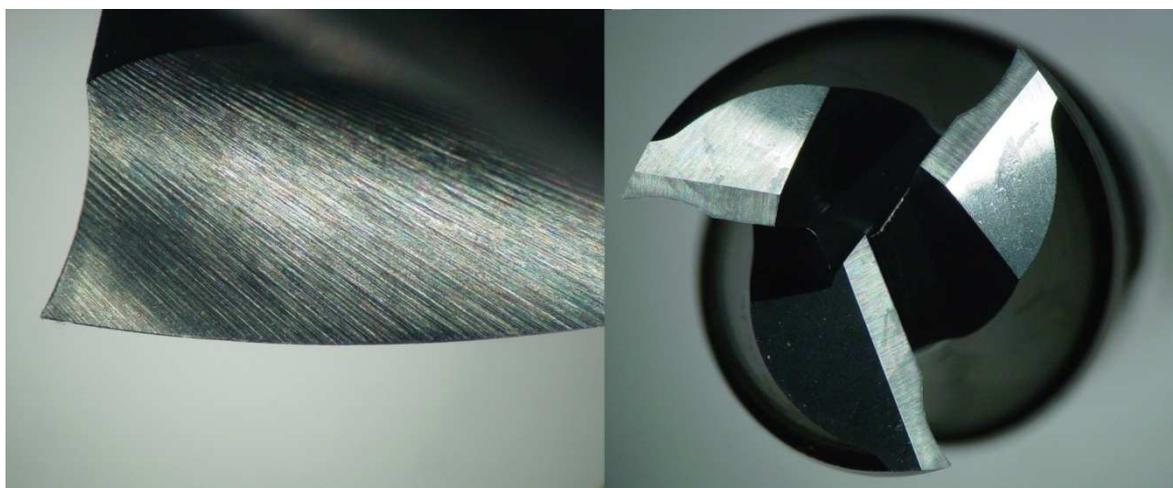
Obrázek 5.5 Nástroj s povlakem nACo® (B)

5.3.3 Povlakovaný nástroj – povlak ALTiN (C)

Povlak tvoří vysoce výkonnou vrstvu pro obrábění materiálů vyšších pevností a tvrdostí. Zároveň je vhodný pro aplikace s nedostatečným chlazením³⁵.

Tabulka 5.4 Technické parametry povlaku ALTiN³⁵.

Barva	Maximální teplota použití	Tvrdost	Koeficient tření (ocel)	Tloušťka povlaku	Teplota depozice
černá	850 °C	33 GPa	0,7	1–4 μm	480 °C



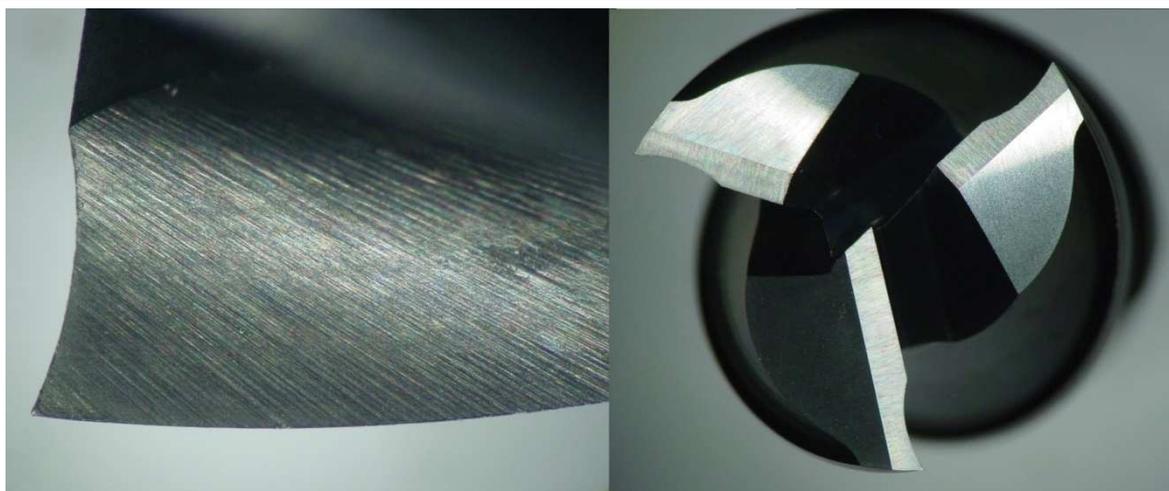
Obrázek 5.6 Nástroj s povlakem ALTiN (C)

5.3.4 Povlakovaný nástroj – povlak AlTiCrN (D)

Povlak určený pro vrtací, soustružnické a frézovací nástroje, které jsou užity v náročných aplikacích. Předností je teplotní odolnost a výkonné obrábění za sucha. Lze s ním obrábět houževnaté materiály, nerez a titan³⁵.

Tabulka 5.5 Technické parametry povlaku AlTiCrN³⁵.

Barva	Maximální teplota použití	Tvrдость	Koeficient tření (ocel)	Tloušťka povlaku	Teplota depozice
šedomodrá	900 °C	34 GPa	0,55	2–4 μm	480 °C



Obrázek 5.7 Nástroj s povlakem AlTiCrN (D)

5.4 Řezné podmínky

V experimentu byly pro všechny nástroje zvoleny stejné řezné podmínky, aby byla zaručena porovnatelnost jednotlivých povlaků. Veškeré hodnoty (řezná rychlost, šířka záběru ostří, posuv na zub) byly voleny dle doporučení výrobce nástrojů pro obráběný materiál a dle možností otáčkové a posuvové řady stroje FB 32V. Použité parametry jsou uvedeny v tabulce 5.6.

Tabulka 5.6 Řezné podmínky pro experiment.

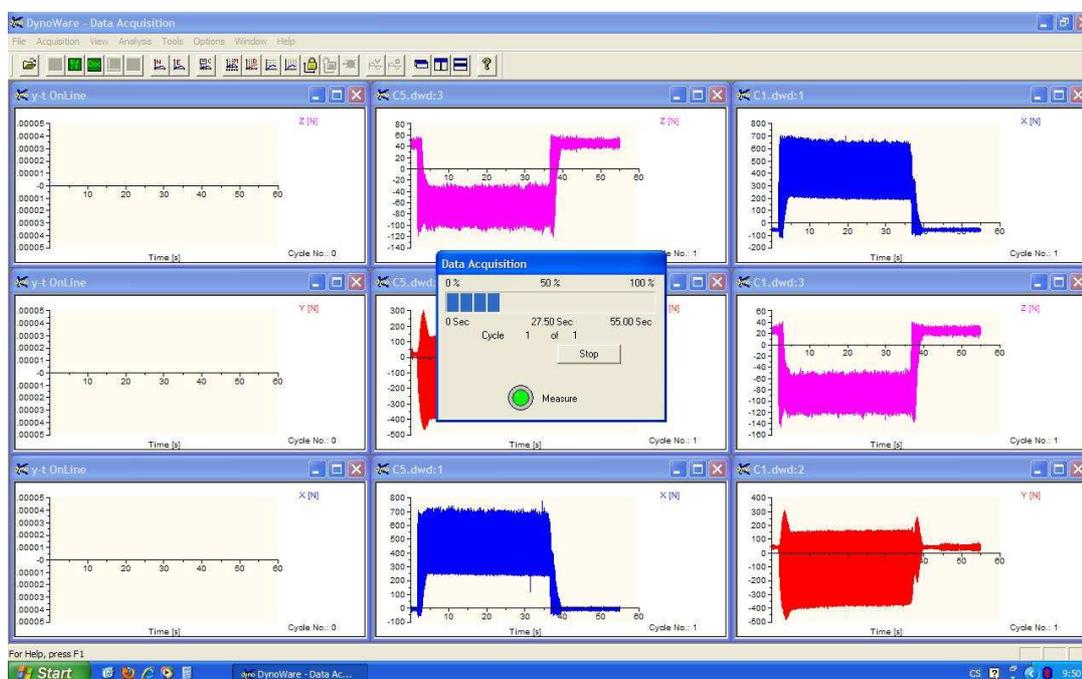
Řezné podmínky			
Řezná rychlost (vztah 2.1)	v_c	40,15	[m.min ⁻¹]
Posuvová rychlost	v_f	160	[m.min ⁻¹]
Posuv na zub (vztah 2.3)	f_z	0,075	[mm]
Otáčky vřetene	n	710	[l.min ⁻¹]
Šířka záběru ostří	a_p	3	[mm]
Šířka radiálního záběru (průměr frézy)	a_e	18	[mm]

5.5 Měřicí aparatura

Pro měření dat byl použit dynamometr značky KISTLER 9275B v kombinaci s nábojovým zesilovačem 5070A. Zesilovač převádí a zesiluje měřený signál (elektrický náboj) na elektrické napětí. Pro vyhodnocení a zobrazení dat byl využit software Dynoware. Schéma zapojení celé sestavy prezentuje obrázek 5.8³⁶.

Obrázek 5.8 Schéma měřící aparatury Kistler ²⁹

Dynamometr Kistler snímá silové účinky v osách x, y, z. Proto i jednotlivé síly mají indexování F_x , F_y , F_z . Měření průjezd byl vždy každý pátý tj. 1., 5., 10. atd. a doba měření byla nastavena na 50 sekund. Grafické rozhraní Dynowaru je na obrázku 5.9. Po dokončení měření se ještě v tomto softwaru provedlo ořezání hodnot, které byly před nájezdem a po výjezdu nástroje z obrobku. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 10 000 Hz a už při exportu dat do textového souboru byla data částečně filtrována.



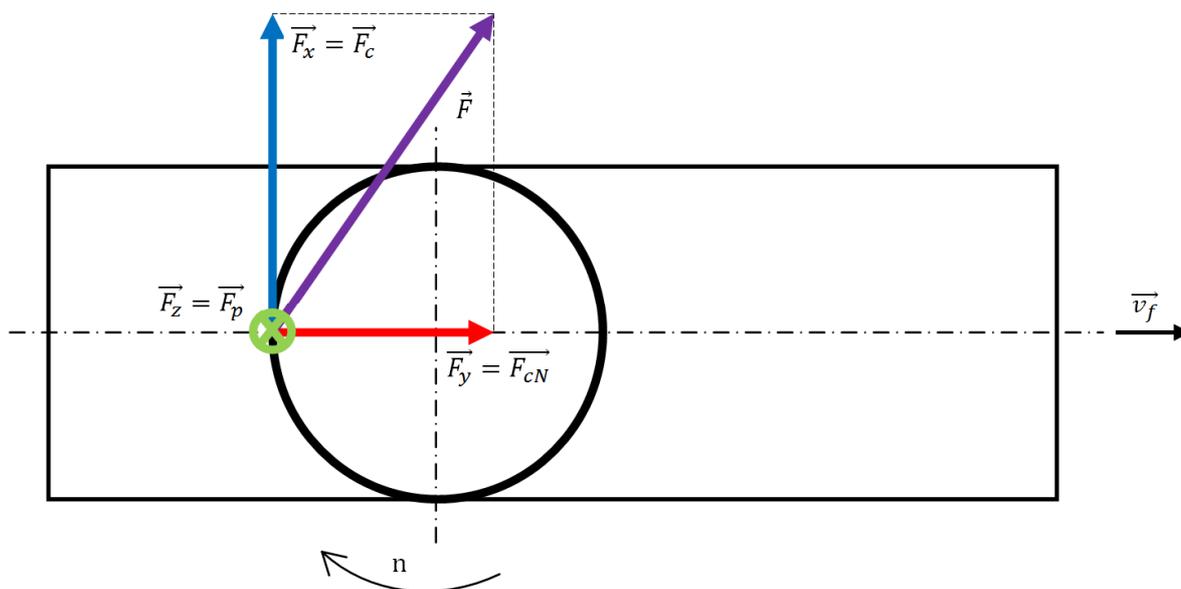
Obrázek 5.9 Grafické rozhraní při měření v softwaru Dynoware

Při převodu z textového souboru (.txt) do tabulkového procesoru (.xlsx) byla data filtrována tak, že pro výsledné grafické zpracování vychází cca 250 hodnot na jeden průjezd.

Z přefiltrovaných hodnot je vypočítána silová výslednice. Je dána vztahem 5.1.⁴

$$F = \sqrt{F_x^2 \cdot F_y^2 \cdot F_z^2} \text{ [N]} \quad (5.1)$$

Protože frézování drážek je symetrické a u frézy se třemi břity je maximální průřez třísky pouze v jenom místě, lze měřené síly F_x , F_y , F_z převést na sílu řeznou (F_c), sílu normálovou (F_{cN}) a sílu pasivní (F_p). Barevné označení na obrázku 5.10 odpovídá barvám v grafech z měření.



Obrázek 5.10 Silový rozbor

5.6 Průběh experimentu

Testování proběhlo na stroji zmíněném v kapitole 5.1, tedy frézce FB 32V. Do vřetene frézky byl upnut upínač typu Weldon, který zajistí rychlé a opakovaně stejné upínání nástroje.

Na stůl frézky (obrázek 5.1 a 5.11) byl připevněn svěrák s dynamometrem Kistler. Polotovar byl upnut na podložkách s vyložení maximálně 10 mm pro maximální tuhost upnutí. Podložky se v průběhu experimentu měnily za větší, protože testovací těleso se zmenšovalo. Po sedmi průjezdech bylo čelo přefrézováno velkou frézovací hlavou značky Narex o průměru 160 mm na jiném stroji a tím byla vytvořena nová plocha pro testování. Než bylo započato vlastní měření, proběhlo několik zkušebních průjezdů pro ověření funkčnosti celé aparatury. Čas jednoho průjezdu je výpočtem (vztah 5.2⁴) 36,75s a naměřený čas na stopkách byl 36,2 sekundy.

$$t_{AS} = \frac{L \cdot 60}{v_f} = \frac{(l_n + l + l_v) \cdot 60}{v_f} \quad (5.2)$$

$$t_{AS} = \frac{(0 + 80 + 18) \cdot 60}{160} = 36,75 \text{ [s]}$$



Obrázek 5.11 Upínač nástroje, svěrák s obrobkem a dynamometr.

Průběh experimentu byl u všech nástrojů stejný. Měřený byl vždy každý první průjezd novým nástrojem a následně pak každý pátý, desátý, patnáctý atd. Ve výsledcích je zobrazen pouze první, desátý, dvacátý a další, protože po pěti přejezdech nedocházelo k žádnému dramatickému nárůstu sil ani opotřebení. **Limitním kritériem** pro ukončení testu byla hodnota opotřebení **VB = 0,2 mm** nebo **40 průjezdů**. Hodnota 40 průjezdů byla vybrána tak, aby byl maximálně využit testovaný materiál. Po každém měřeném průjezdu (5, 10, 20, 30 a 40) bylo měřeno opotřebení na každém břitu nástroje a jakost obrobené plochy. Pro měření opotřebení byl využit optický mikroskop (obrázek 5.13), který je vybaven přesným odměřováním. Drsnost povrchu byla měřena vždy ve třech místech obrobené plochy digitálním drsnoměrem Taylor Hobson Surtronic S128 (obr. 5.12).



Obrázek 5.12 Drsnoměr Taylor Hobson Surtronic S128³⁷



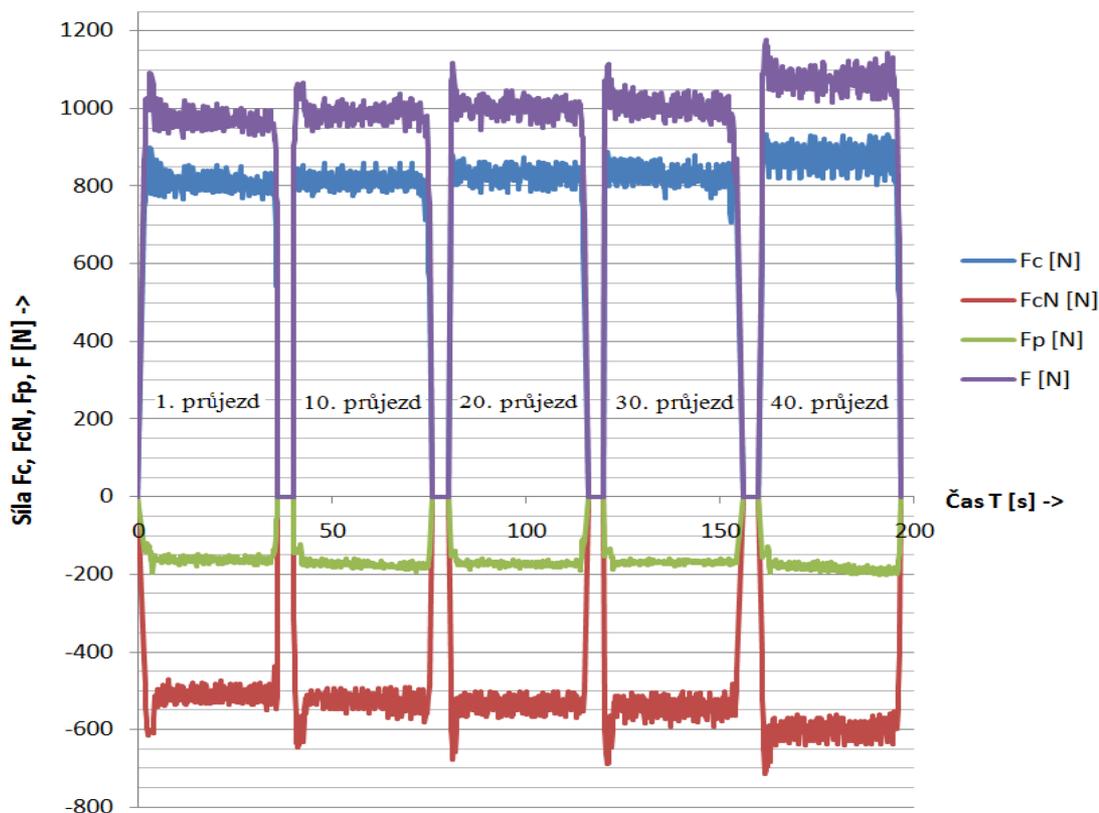
Obrázek 5.13 Mikroskop BM 1 V C 332 pro měření opotřebení VB

6 ROZBOR VÝSLEDKŮ

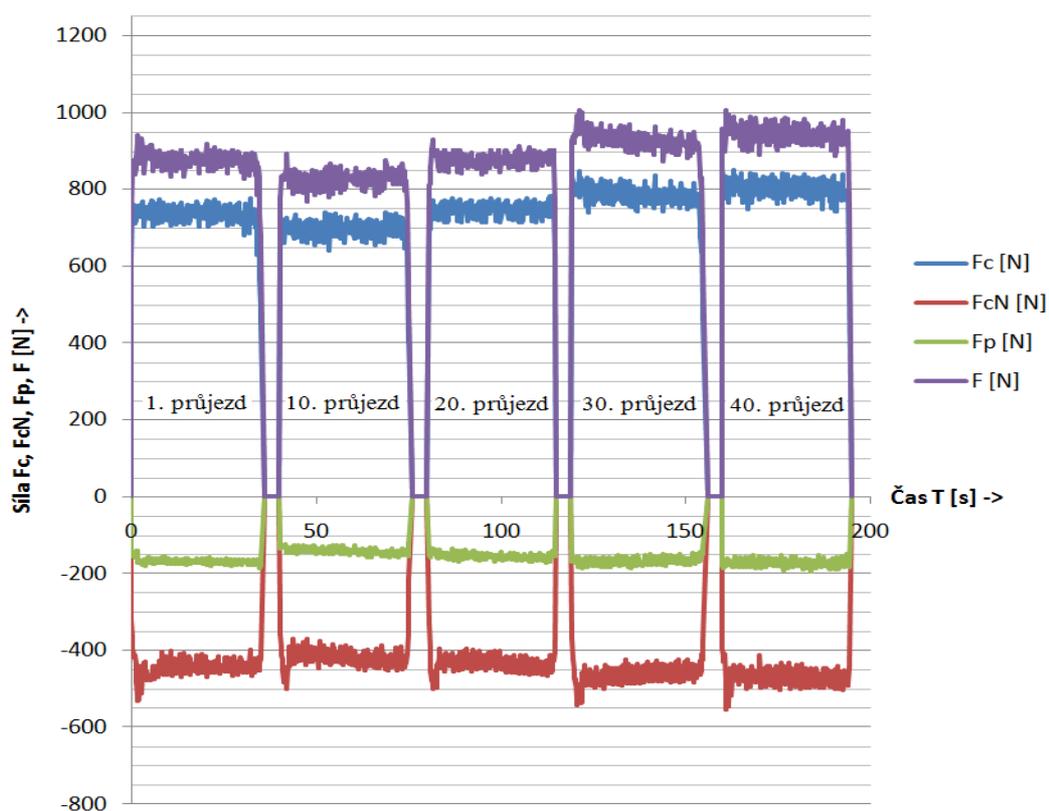
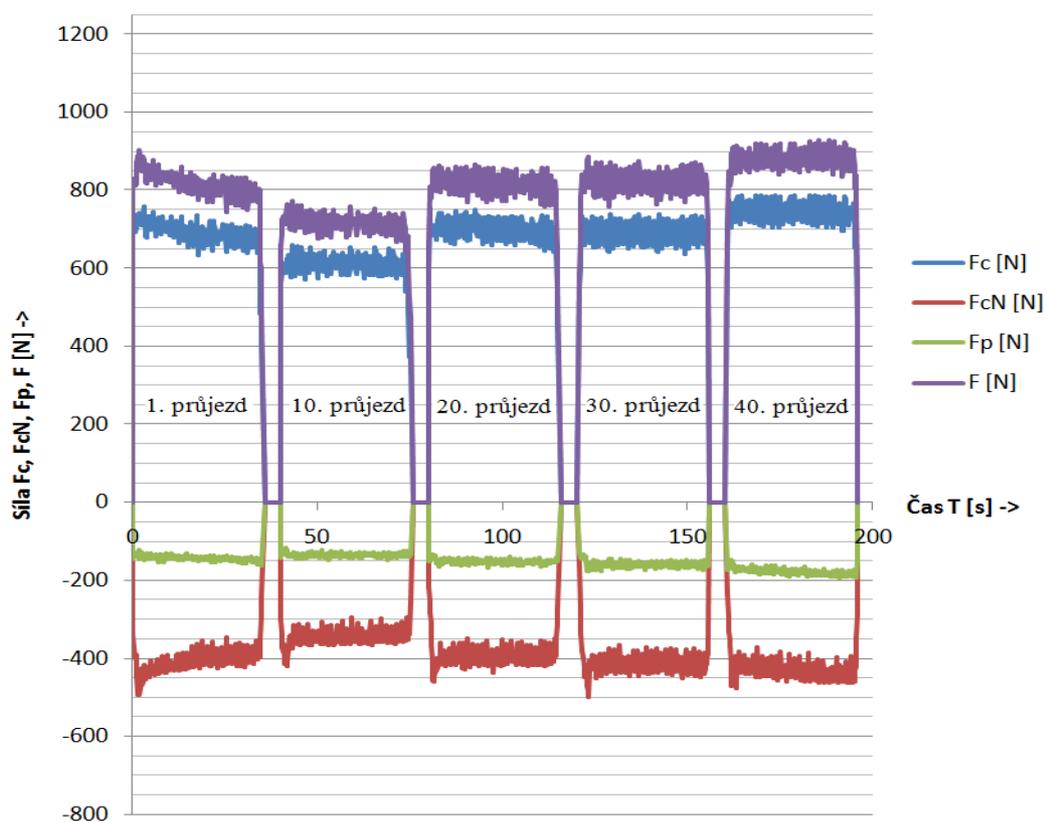
Během měření silového působení a opotřebení se dle očekávání ukázalo, že nepovlakovaný nástroj je opotřeбенý daleko rychleji než nástroje povlakované. Vliv měla zároveň teplota obrobku. Ta měřena nebyla, avšak výkyv ve velikosti sil je patrný u 30. průjezdu nástroje s AlTiNCr povlakem (D).

6.1 Grafické vyhodnocení silového působení

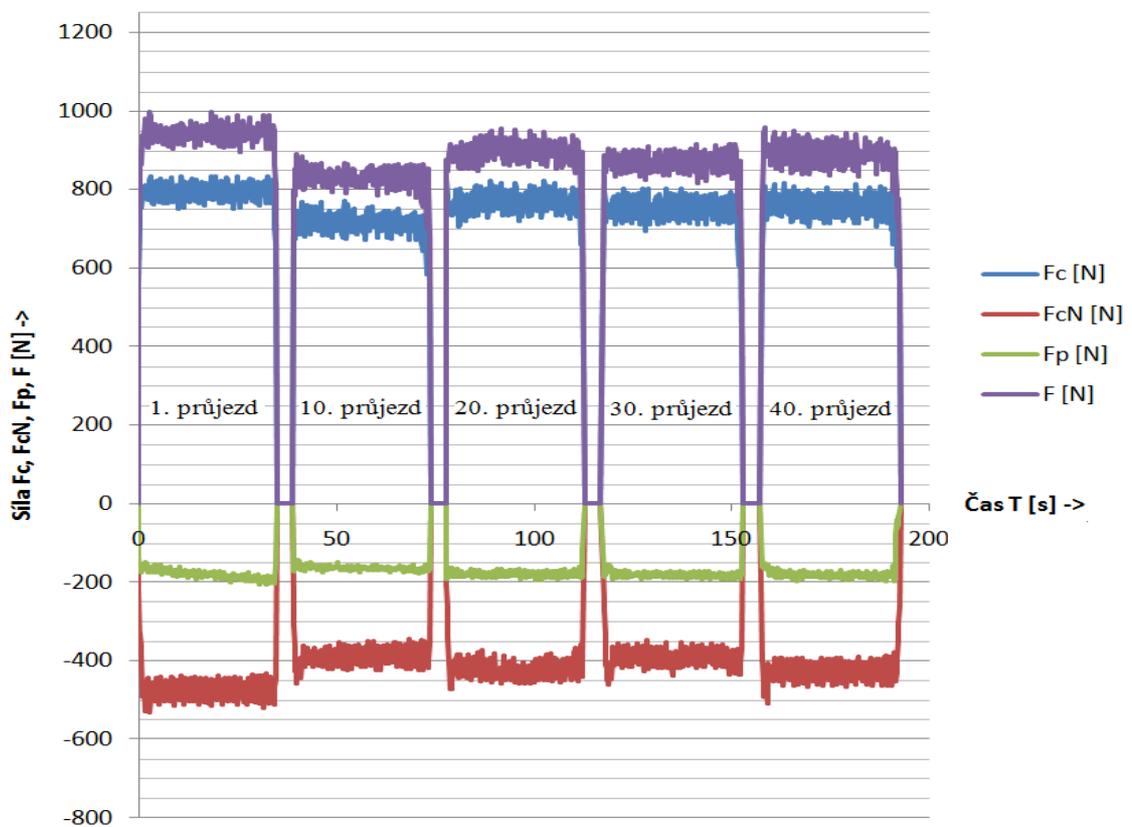
Časová osa u obrázků 6.1 až 6.4 neodpovídá reálným časům obrábění. Toto uspořádání bylo zvoleno pro názornost a přehlednost velikosti sil. Kvůli názornosti a porovnatelnosti jednotlivých nástrojů jsou měřítka os stejná pro všechny obrázky.



Obrázek 6.1 Průběh silového zatížení pro nepovlakovanou frézu (A)

Obrázek 6.2 Průběh silového zatížení pro povlakovanou frézu nAcO[®] (B)

Obrázek 6.13 Průběh silového zatížení pro povlakovanou frézu AlTiN (C)

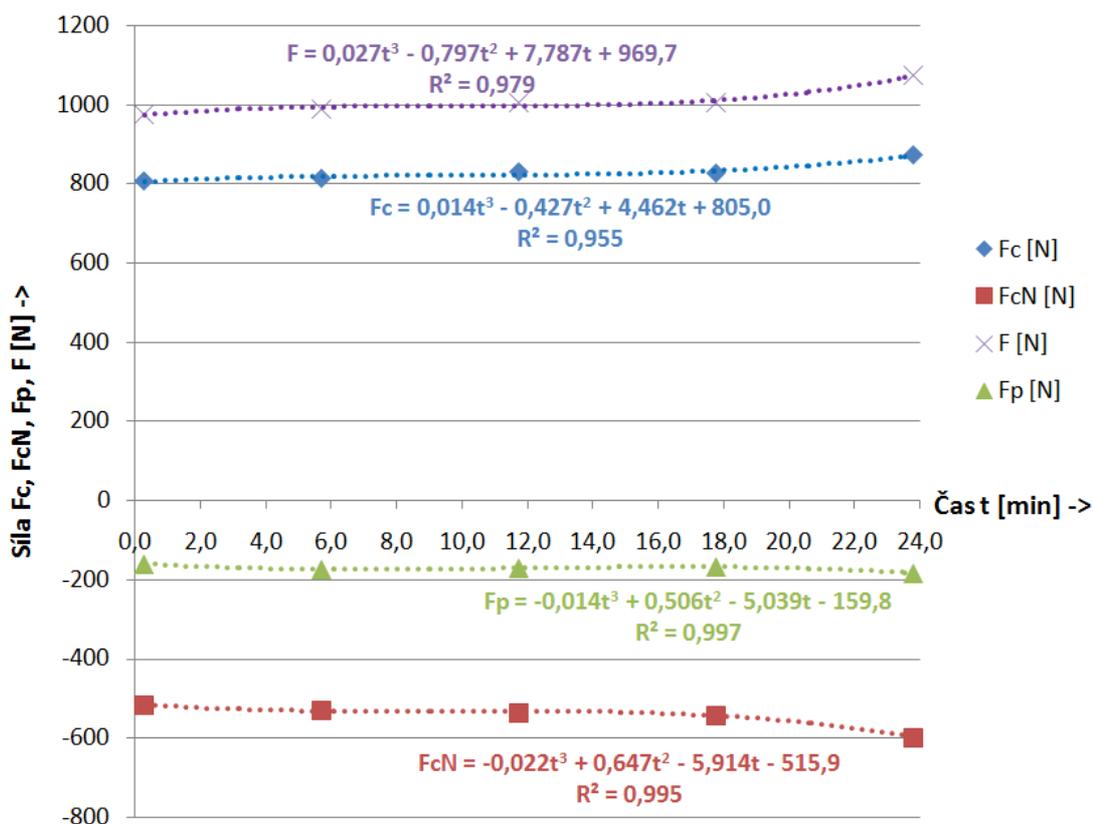


Obrázek 6.4 Průběh silového zatížení pro povlakovanou frézu AlTiNCrN (D)

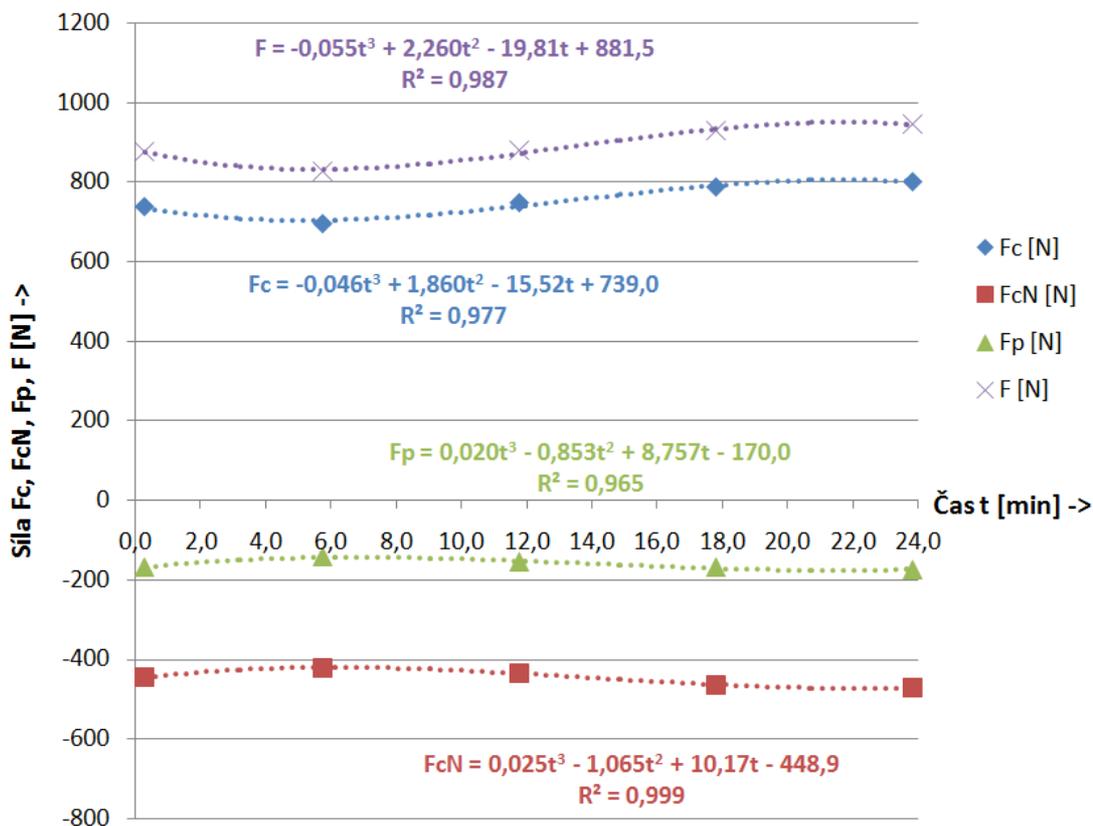
Na obrázcích 6.1 až 6.4 jsou vyobrazeny filtrované hodnoty působících sil během jednotlivých průjezdů. U **nepovlakované frézy** je vidět postupný nárůst všech sil. Nejvyšší řezná síla F_c byla dle očekávání naměřena u nepovlakovaného nástroje. Hodnoty neustále rostly a při čtyřicátém průjezdu bylo navýšení z původních průměrných 820 N na **870 N**. To je **nárůst o 7,4 %**. U **nástroje s povlakem B** došlo po prvních průjezdech k zaběhnutí povlaku a jeho mírnému opotřebení, kdy se naplno projevila jeho funkčnost. Proto je řezná síla F_c na desátém průjezdu o cca 5 % nižší. Poté už síla opět postupně narůstá a po posledním průjezdu je průměrná hodnota $F_c = 802$ N, což se rovná **9% nárůstu**. První průjezd druhého povlakovaného **nástroje (C)** začíná s hodnotou řezné síly $F_c = 694$ N s následným poklesem na 619 N (první opotřebení povlaku jako v předchozím případě). Po posledním průjezdu je průměrná hodnota řezné síly $F_c = 746$ N. **Nárůst síly je 7,5 %**. Posledním nástrojem je **nástroj s povlakem D**. Počáteční řezná síla $F_c = 794$ N a stejně jako u ostatních povlakovaných nástrojů dochází k poklesu na 716 N (pokles asi o 9 %). Nástroj D byl při měření ovlivněn zbytkovým teplem v obrobku (30. průjezd). Poslední průjezd měl průměrnou hodnotu $F_c = 761$ N, a to odpovídá **poklesu o 4,1 %**. Změny hodnot ostatních sil jsou analogické k vývoji hodnot F_c .

6.2 Průměrné hodnoty velikosti sil v časové závislosti

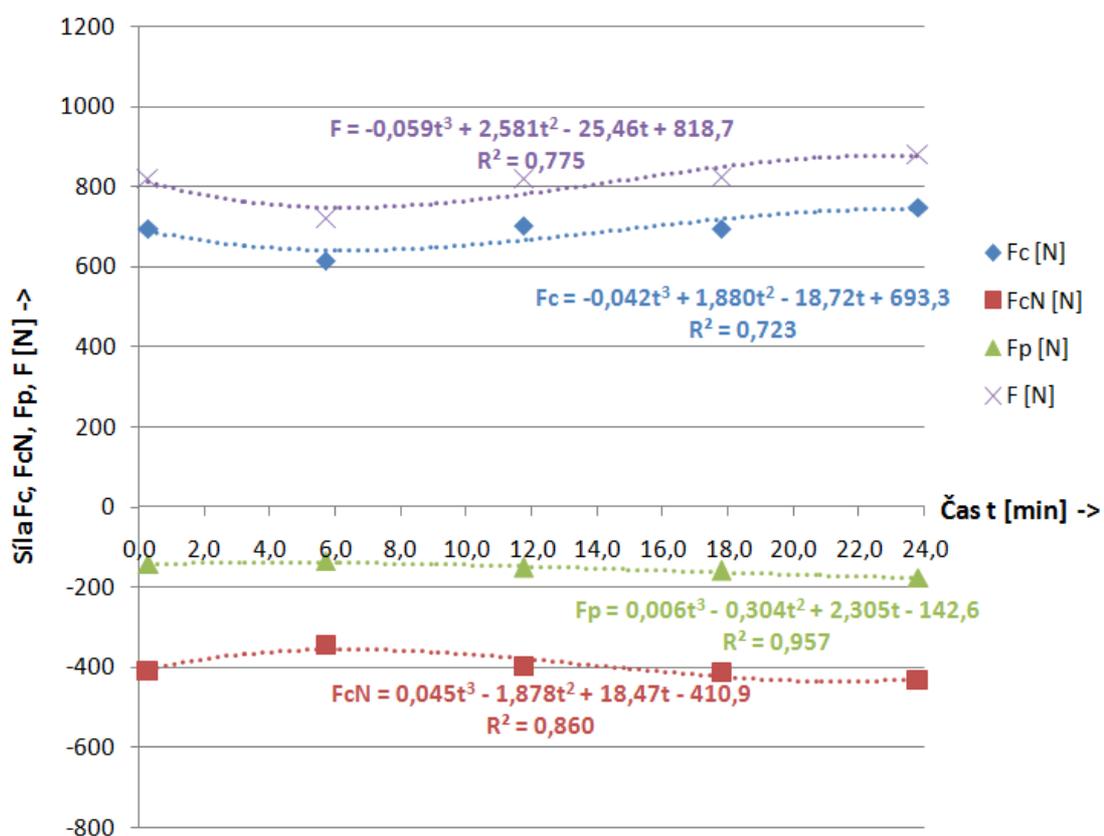
Pro možnost zjištění velikosti jednotlivých sil v libovolném čase je v obrázcích 6.5 až 6.8 uvedena grafická závislost průměrné hodnoty velikosti síly na reálném čase obrábění. Zároveň je zde doplněna rovnice regrese pro možnost výpočtu přesnější hodnoty, než kterou lze odečíst z obrázku. Do výpočtu průměrné hodnoty nebyly zaznamenány hodnoty z nájezdu a výjezdu nástroje z řezu. Tyto hodnoty by zkreslovaly výsledky.



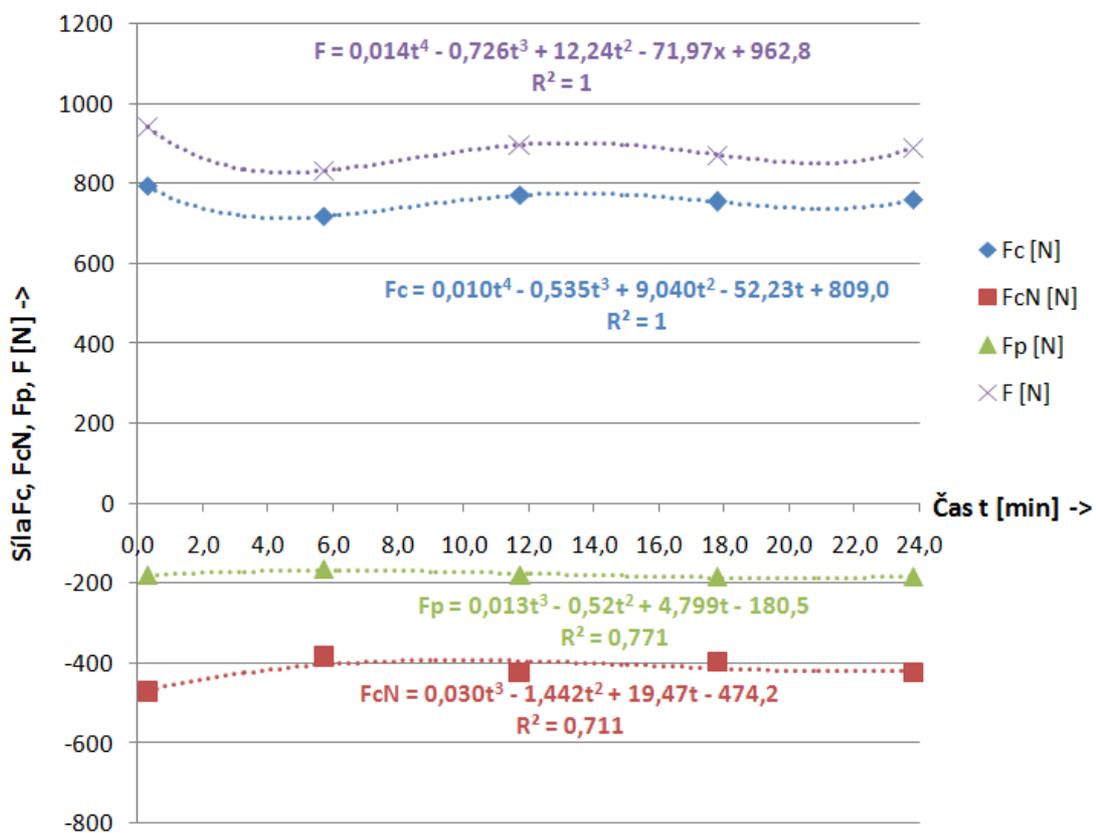
Obrázek 6.5 Průběh průměrného silového zatížení pro nepovlakovanou frézu (A).



Obrázek 6.6 Průběh průměrného silového zatížení pro povlakovanou frézu nACo® (B).



Obrázek 6.7 Průběh průměrného silového zatížení pro povlakovanou frézu AlTiN (C).



Obrázek 6.8 Průběh průměrného silového zatížení pro povlakovanou frézu AlTiN/CrN (D).

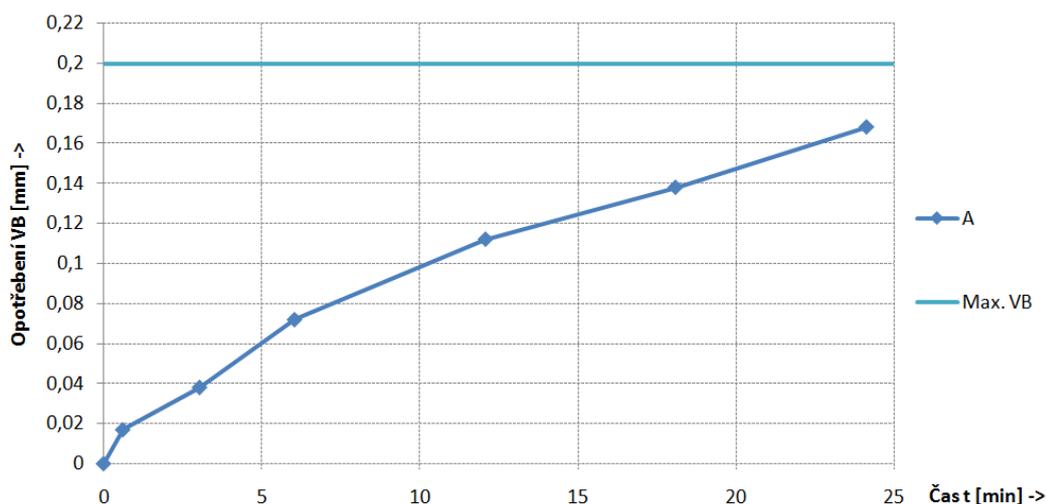
6.3 Trvanlivost a vliv povlaků dle kriteria VB

Po každém měřeném průjezdu byla na optickém mikroskopu měřena šířka fazetky opotřebení na hřbetě, tedy kritérium opotřebení VB. Měřeny byly vždy všechny tři břity, ale hodnoty opotřebení vykazovaly přibližně stejné hodnoty, proto je vždy uveden průměr těchto hodnot. Nový nástroj vykazoval opotřebení VB = 0 mm, první hodnoty byly měřeny při pátém průjezdu a následně pak každý desátý průjezd (tj. 5., 10., 20., 30. a 40.). Naměřené hodnoty VB a doba trvanlivosti jsou uvedeny v tabulce 6.1.

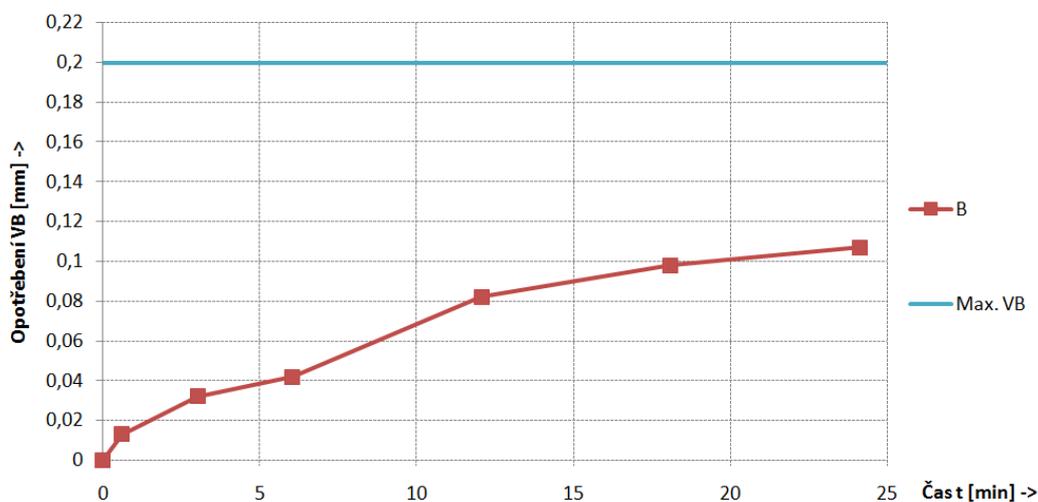
Tabulka 6.1 Konečné hodnoty opotřebení VB.

Povlak	Dosažená hodnota VB [mm]	Trvanlivost [min]
Bez povlaku (A)	0,168	24,13
nACo [®] (B)	0,107	
AlTiN (C)	0,087	
AlTiCrN (D)	0,107	

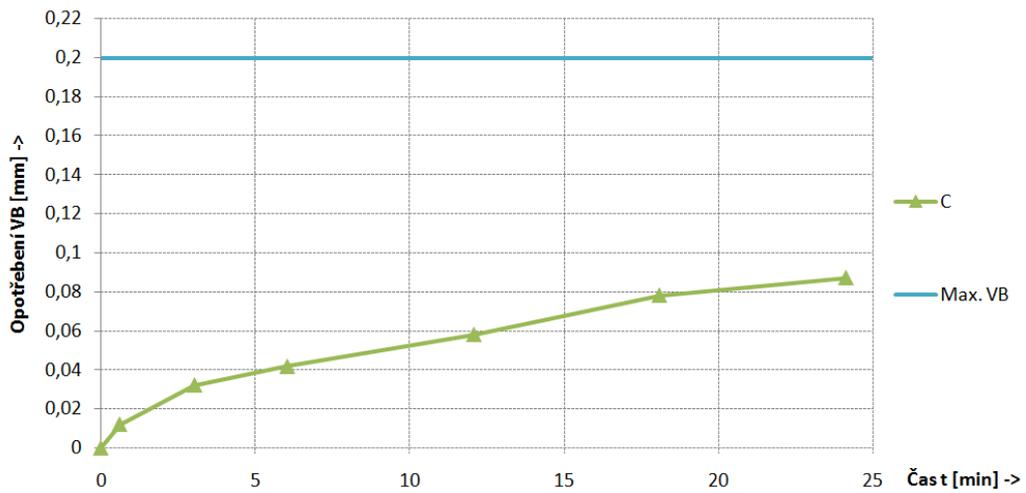
Vývoj opotřebení jednotlivých nástrojů je na obrázcích 6.9 až 6.12 a vzájemné porovnání všech nástrojů je na obrázku 6.13.



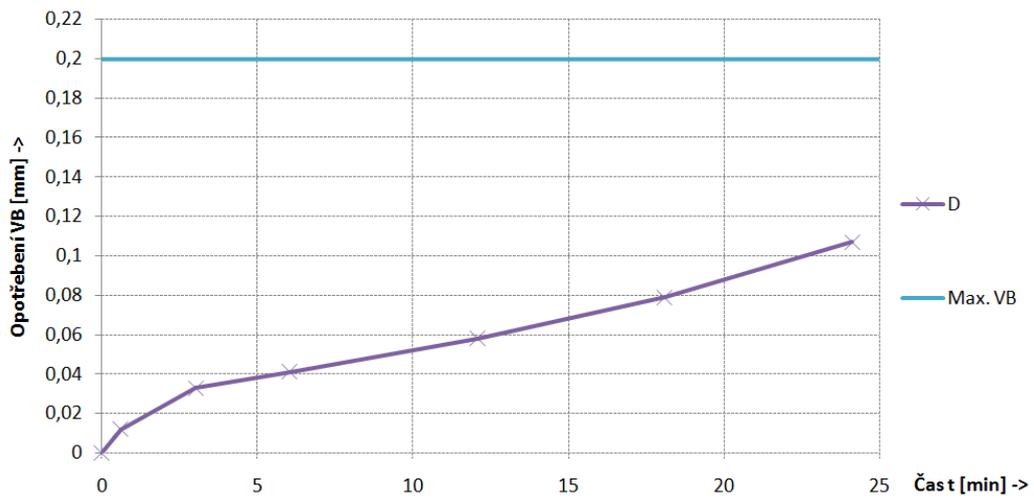
Obrázek 6.9 Vývoj opotřebení VB u nepovlakovaného nástroje (A).



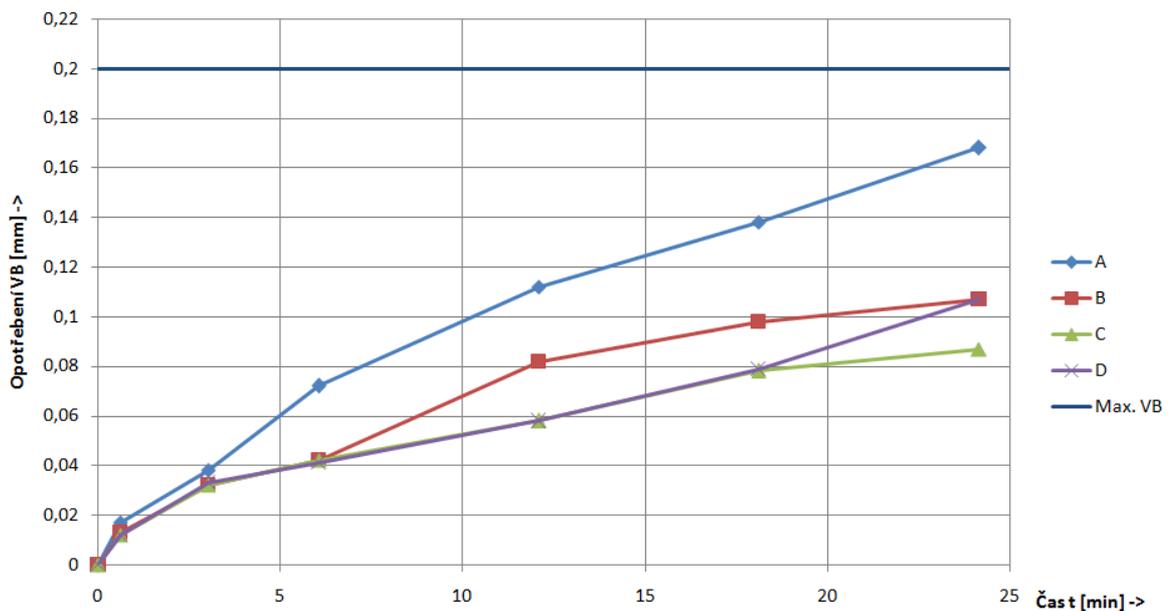
Obrázek 6.10 Vývoj opotřebení VB u nástroje s povlakem nACo[®] (B).



Obrázek 6.11 Vývoj opotřebení VB u nástroje s povlakem AlTiN (C).

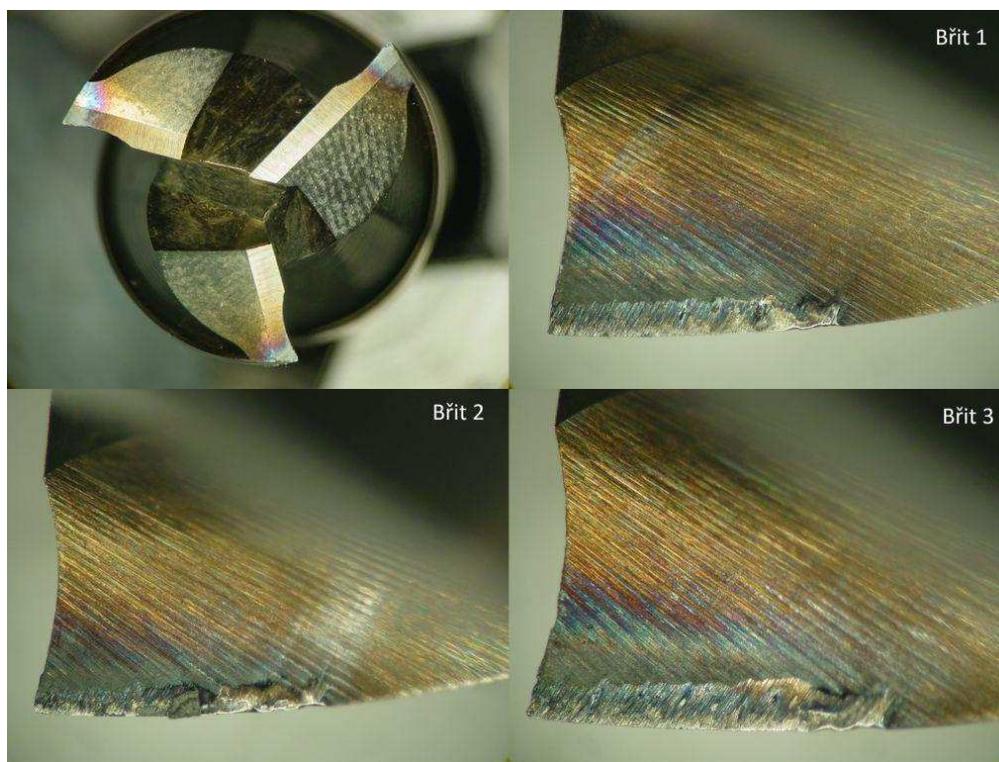


Obrázek 6.12 Vývoj opotřebení VB u nástroje s povlakem AlTiNCrN (D).

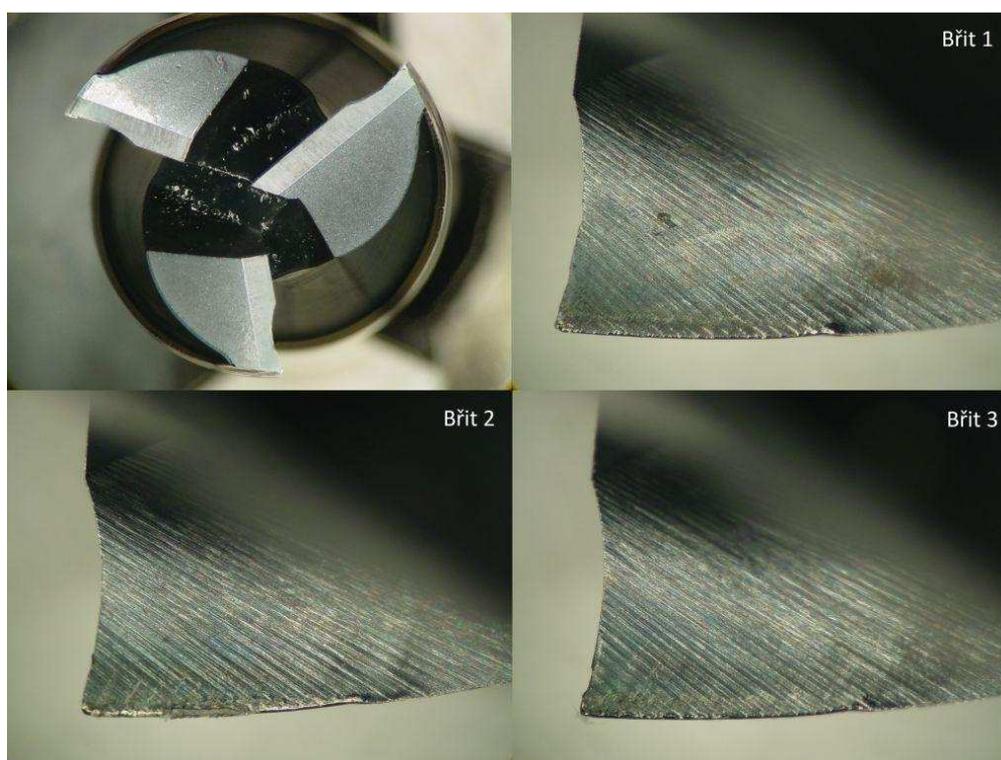


Obrázek 6.13 Porovnání vývoje opotřebení všech testovaných nástrojů.

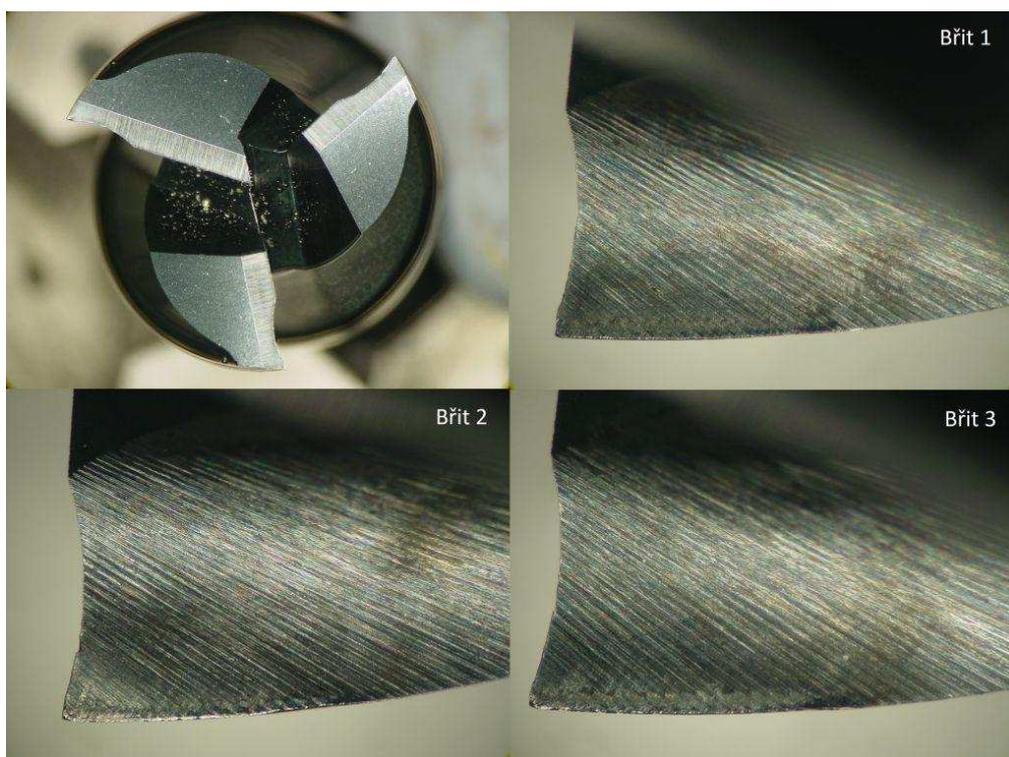
Na obrázcích 6.14 až 6.17 jsou zachyceny detaily opotřebeného čela jednotlivých břitů na každém testovaném nástroji. U povlakovaných nástrojů není opotřebení tak výrazné jako u nepovlakovaného nástroje.



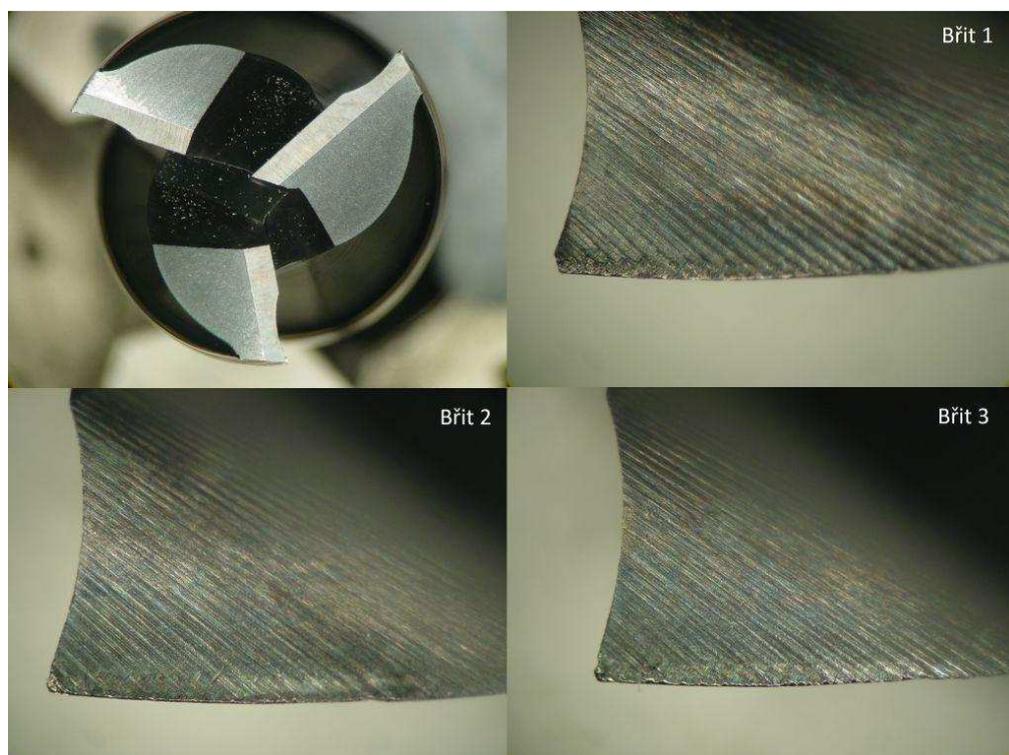
Obrázek 6.14 Čelní opotřebení nepovlakovaného nástroje (A).



Obrázek 6.15 Čelní opotřebení povlakovaného nástroje nACo[®] (B).



Obrázek 6.16 Čelní opotřebení povlakovaného nástroje AlTiN (C).

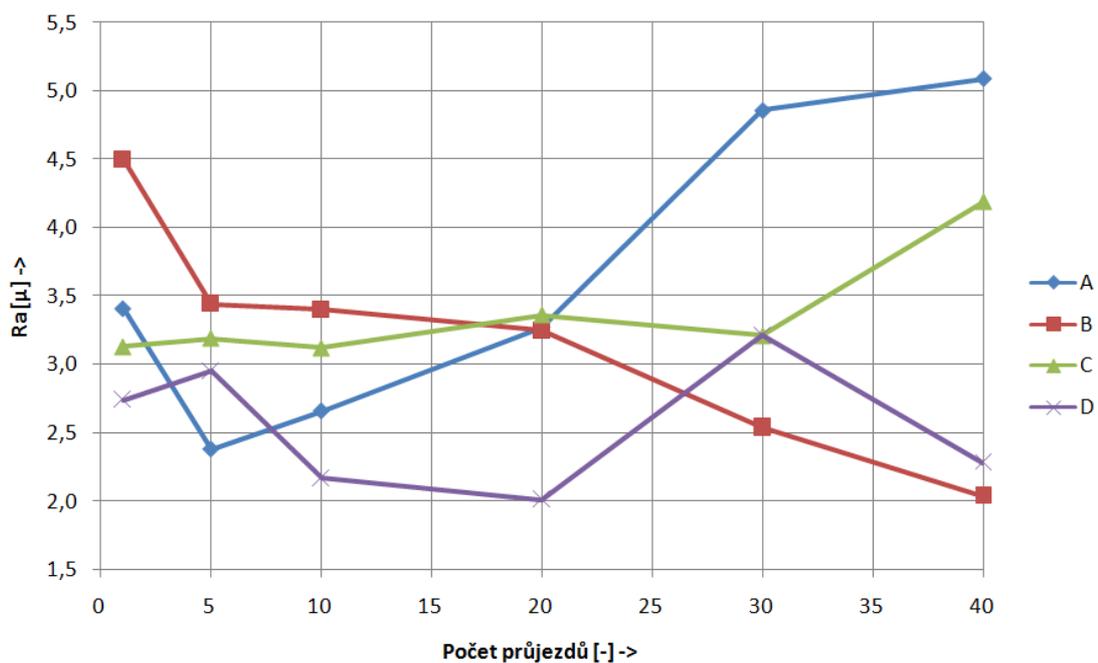


Obrázek 6.16 Čelní opotřebení povlakovaného nástroje AlTiCrN (D).

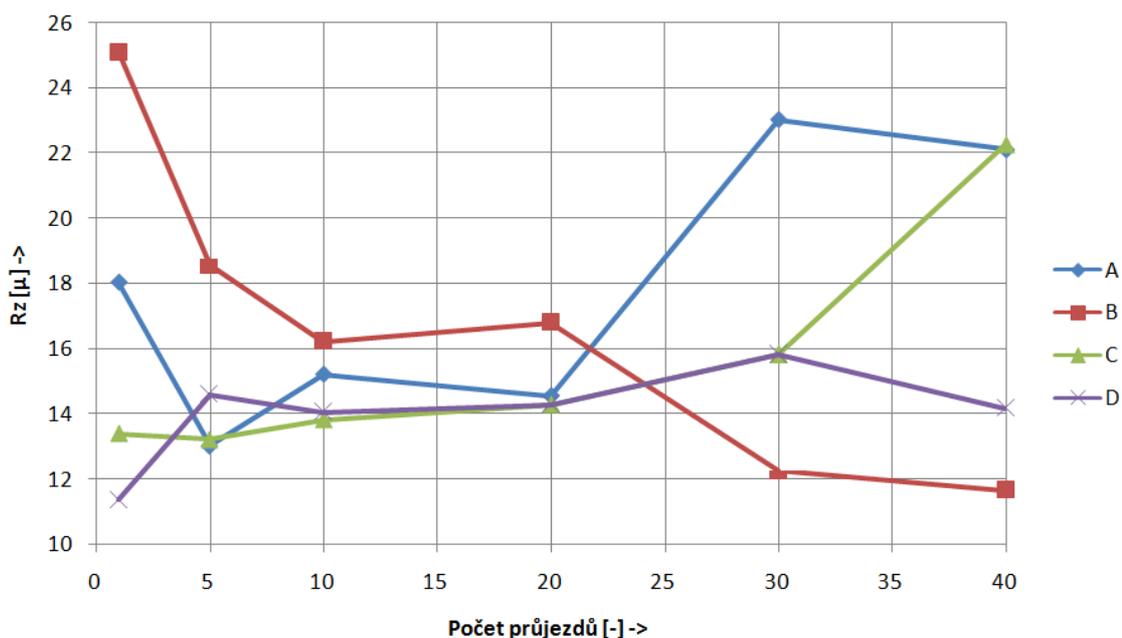
Při srovnání povlaků vychází nejodolněji AlTiN, který dosáhl opotřebení 0,087 mm. To je cca o **20 % menší** hodnota než u povlaků AlTiCrN (D) a nACo[®] (B). Nepovlakovaný nástroj má břity poznamenané teplotní zátěží (modrofialová barva přechází do oranžové) a opotřebení dvojnásobné proti povlaku AlTiN.

6.4 Analýza jakostí povrchu

Ve strojírenství je velmi důležitým faktorem i jakost obrobené plochy. Ta má přímou návaznost i na přesnost rozměrů. Během experimentu byl měřen drsnoměrem povrch po průjezdech 1, 5, 10 až 40. Na každém průjezdu byly provedeny 3 měření na vzdálenosti 4 mm a výsledek byl zprůměrován. Cílem bylo porovnat vliv opotřebení nástroje a dosažené jakosti povrchu. Na obrázku 6.17 je závislost průměrné aritmetické úchytky profilu **Ra** na počtu průjezdů a na obrázku 6.18 je stejná závislost max. výšky profilu **Rz**.



Obrázek 6.17 Průměrná aritmetická úchytka profilu.

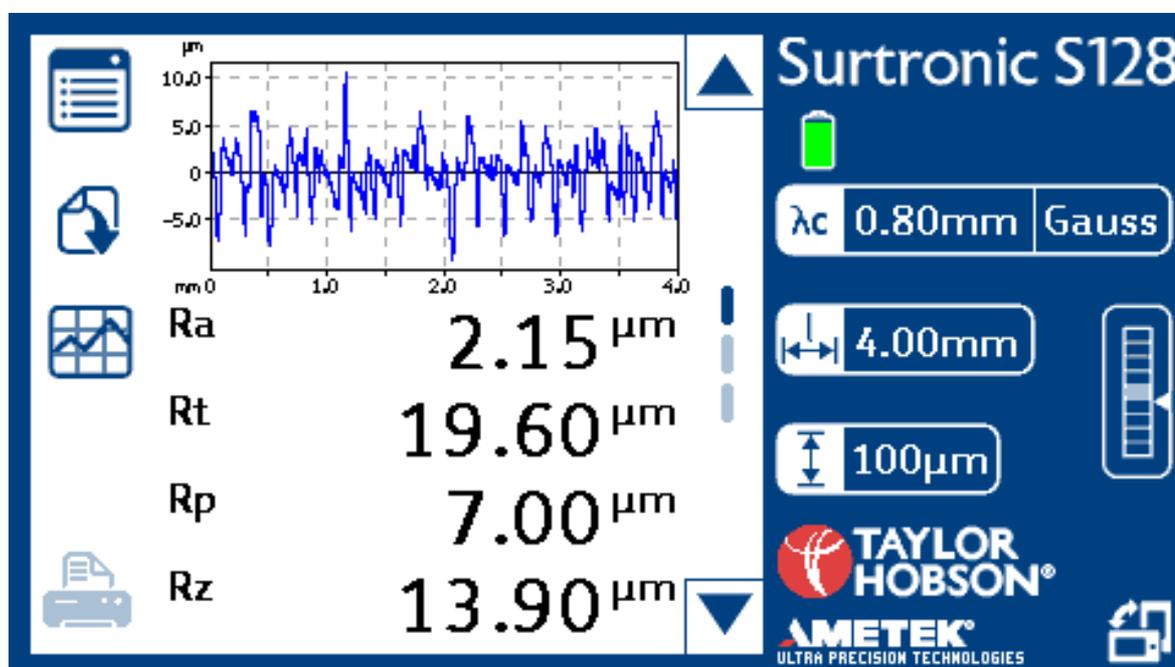


Obrázek 6.18 Maximální výška profilu.

Poznámka: Měřítka os obrázků 6.17 a 6.18 si vzájemně neodpovídají.

Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a svým tvarem kopíruje naměřené výsledky maximální výšky profilu R_z . Nejvyšší hodnota R_z byla naměřena u nástroje **nACo[®] (B)** po prvním průjezdu. Hodnota výšky profilu byla $25,1 \mu\text{m}$, avšak se zaběhnutím nástroje se hodnota **R_z** zmenšovala až na **$11,67 \mu\text{m}$** . To je nejlepším výsledkem jakosti obrobené plochy. Při této hodnotě R_z vychází průměrná aritmetická úchylka profilu **R_a $2,04 \mu\text{m}$** . Za stabilní a vyrovnanou jakost povrchu lze určit obrobené plochy nástrojem **AlTiN (C)**. Ten až do třicátého průjezdu vykazoval **R_a cca $3,2 \mu\text{m}$** a **R_z v průměru okolo $14 \mu\text{m}$** . Nástroj s povlakem **AlTiCrN (D)** dosáhl u dvacátého průjezdu minima ze všech měření, a to hodnoty R_a $2,01 \mu\text{m}$, nicméně R_z již nejnižší není. Celkově je průběh hodnot nástroje D nevyrovnaný. Nepovlakovaný nástroj po svém zaběhnutí od desátého průjezdu kvalitu obrobené plochy jen zhoršoval až na maximální hodnoty, nejhorší ze všech nástrojů, R_a $5,09 \mu\text{m}$ a R_z $22,13 \mu\text{m}$.

Na obrázku 6.19 je ukázka záznamu z měřidla Surtronic S128 ze čtyřicátého průjezdu nástroje AlTiCrN (D).



Obrázek 6.19 Grafický výstup drsnoměru Surtronic S128 z průjezdu D40

ZÁVĚR

Teoretická část je věnována charakteristice rychlořezných ocelí se zaměřením na tepelné zpracování a značení, technologii frézování, výrobu povlaků a typy opotřebení nástrojů.

V práci bylo cílem provést experiment založený na srovnání silového zatížení a opotřebení tří nástrojů s PVD povlaky a jednoho nástroje bez povlaku. Kritériem opotřebení byla šířka fazetky na hřbetě VB. Testovaným nástrojem byla fréza se třemi břity o průměru 18 mm při šířce záběru ostří $a_p = 3$ mm. Čas jednoho průjezdu byl 36,2 sekundy. Během procesu frézování nebylo použito žádných procesních kapalin.

Pro experiment byly použity následující typy nástrojů:

- nepovlakovaná fréza (A),
- fréza s povlakem nACo[®] (B),
- fréza s povlakem AlTiN (C),
- fréza s povlakem AlTiCrN (D).

Výsledky průběhu silového experimentu jsou:

- řezné podmínky pro všechny nástroje byly konstantní ($v_c = 40,15$ m.min⁻¹, $v_f = 160$ m.min⁻¹, $f_z = 0,075$ mm, $a_p = 3$ mm),
- kritérium opotřebení VB bylo nastaveno na 0,2 mm, které bylo limitní pro ukončení testu, a v případě nedosažení této hodnoty bylo limitem 40 průjezdů,
- velikost řezných sil byla **u povlakovaných nástrojů** dle očekávání **menší** než u nástroje bez povlaku, a to zhruba **o 8 %**,
- nejméně byl silově namáhán nástroj s povlakem **AlTiN (C)** s maximální hodnotou řezné síly **746 N** při porovnání čtyřicátých průjezdů,
- všechny nástroje s povlaky vykázaly po záběhu pokles všech silových složek (F_c , F_{cN} a F_p),
- nástroje AlTiN (C) a AlTiCrN (D) mají po čtyřiceti průjezdech **rozdíl** v F_c pouze **15 N** (1,9 % vztaženo k nástroji D),
- třísky z povlakovaných nástrojů byly zatočené do drobné spirály s namodralou barvou (teplota okolo 500 °C) a třísky z průjezdů po nepovlakovaném nástroji jsou rovné, nadrobené a šedomodré.

Posouzení trvanlivosti nástrojů:

- během testování ani jeden z nástrojů nepřekročil limitní opotřebení VB = 0,2 mm,
- nejnižší opotřebení vykázal nástroj s povlakem **AlTiN (C)** **VB = 0,087 mm** při čistém času obrábění **t = 24,13 minut**,
- nepovlakovaný nástroj vykázal téměř dvojnásobné opotřebení než nástroj C,
- nástroje nACo[®] (B) a AlTiCrN (D) mají po čtyřiceti průjezdech totožné opotřebení.

Jakost obrobené plochy v průběhu experimentu:

- jakost povrchu se po zaběhnutí nástroje zlepšila,

- nástroj nACo[®] (B) dosáhl nejnižší hodnoty $R_a = 2,04 \mu\text{m}$ a $R_z = 11,67 \mu\text{m}$ na konci experimentu,
- fréza s povlakem AlTiCrN (D) na konci experimentu měla výsledky jakostí povrchu jen o 10% horší než nástroj nACo[®] (B).

Na základě vyhodnocení experimentu provedeného v této diplomové práci, lze vyvodit závěr, že pro frézování nízkolegovaných nástrojových ocelí typu blízkého 19 312 je vhodným povlakem AlTiN (C). Jeho používání při vhodných řezných podmínkách zbytečně nezatěžuje obráběcí stroj a přináší tak úsporu na provozních nákladech. Při frézování bez chlazení roste teplota obrobku a tím klesá řezný odpor materiálu. Povlak AlTiN je dostatečně odolný a u hrubovacích operací bez nároků na vysokou přesnost by se dalo tohoto faktu využít.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FREMUNT,P., KREJČÍK, J., PODRÁBSKÝ, T. *Nástrojové oceli*. 1. Vyd. Brno: Dům techniky Brno, 1994. 234 s.
2. FISCHER, Ulrich. *Základy strojnictví*. 1. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2004, 290 s. ISBN 80-867-0609-5.
3. LASSNER,E., SCHUBERT,W-D. *Tungsten - Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds*. 1. Vyd, New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 1999, 422 s. ISBN 978-1-4615-4907-9
4. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
5. KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
6. NĚMEC, K. *Nástrojové oceli*. [online]. [cit. 2017-03-12]. Studijní opory předmětu 3SV – struktura a vlastnosti materiálů. Brno: VUT FSI, Ústav materiálových věda inženýrství. 2008, 31s. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/07%20-%20Nastrojove%20oceli.pdf
7. PROTIVA, K., LIEBERZEIT V. *Směry inovace sortimentu nástrojových ocelí. Hutnické aktuality b*. Dobrá: Výzkumný ústav hutnictví železa [Dobrá], 1987, 28(2), 3-33. ISSN 0322-8525.
8. BÍLEK, P., *Metodika hodnocení strukturních změn v ocelích při tepelném zpracování*. 14 stran [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf/BilekPavel-336906.pdf>
9. BÖHLER, S630. 1 strana [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.bohler.cz/czech/files/downloads/S630.pdf>
10. BOLZANO. *Zpracování nástrojových ocelí*. 5 stran [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Nastrojove_oceli/MOP_Zpracovani%20nastrojovych_%20oceli.pdf
11. BOLZANO. HS6-5-2. 1 strana [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Nastrojove_oceli/MOP_HS6-5-2.pdf
12. LENTUS. 19830. [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.lentus-ocel.cz/tridy-oceli/n-19830.htm>
13. PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1999, 350 s. ISBN 80-720-4130-4.
14. JEŽEK, J., VOBOŘIL, J. *Elektronová metalografie jemnozrnných fází*. Praha: Academia 1972, 218 s.
15. LEINVEBER, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. 915 s. ISBN 80-7361-033-7
16. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.

17. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIC CZ s.r.o. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. české vyd. Praha: Scientia, 1997, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 91-972-2994-6.
18. WELCO, *Převodní tabulka*. 12 stran [online]. [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: https://www.welco.sk/cz/library/files/dokumenty/Prevodni_tabulka_Wr.Nr_a_CSN.pdf
19. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
20. HUMÁR, A. *Technologie I*. [online]. [cit. 2017-04-15]. Studijní opory pro magisterskou formu studia v oboru "Strojírenská technologie" VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138s. URL: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
21. ZOUHAR, J. *Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky*. Disertační práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie, 2009, 104s.
22. MATTOX, D. *Handbook of Physical vapor deposition (PVD) processing: principles, technology, and applications*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2010, xlvi, 746 s. ISBN 978-0-81-552037-5.
23. PIERSON, H. *Handbook of Chemical vapor deposition (CVD): principles, technology, and applications*. 2nd ed. Norwich: Noyes Publications, 1999, xxiv., 482 s. ISBN 08-155-1432-8.
24. OHRING, M. *Materials science of thin films: deposition and structure*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2002. ISBN 01-252-4975-6.
25. BUNSHAH, R.F. et al. *Handbook of Hard Coatings*. Norwich, New York, USA: Noyes Publications/William Andrew Publishing, LLC. 2001. 550 s. ISBN 0-8155-1438-7
26. HOLUBÁŘ, P., ŠÍMA, M., ZINDULKA, O. *Technologie úprav nástrojů před a po povlakování*. MM Průmyslové spektrum. Zář 2005, č. 9. s. 70-72. Praha: SEND Předplatné s.r.o., 2005. ISSN 1212-2572.
27. SHM s.r.o. *Úpravy nástrojů* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/upravy-nastroju/>
28. SHM s.r.o. *Stripping* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/stripping/>
29. JAROŠ, A. *Nové frézovací nástroje z rychlořezných ocelí pro hrubovací operace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 147 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
30. STAHLNETZ, *Stahllexikon* 49 stran [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://eng.stahlnetz.de/files/eng/Stahllexikon.pdf>
31. BOLZANO. *1.2842* 2 strany [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/1.2842_cesky.pdf
32. ZPS-FN. *Společnost ZPS - FRÉZOVACÍ NÁSTROJE* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/spolecnost-zps-frezovaci-nastroje/>

33. ZPS-FN. *Frézy válcové čelní krátké, 1 břít přes střed, typ N, ploška weldon* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/frezy-valcove-celni-hss/detail/frezy-valcove-celni-kratke,-1-brit-pres-stred,-typ-n,-ploska-weldon,-din-844k,-rychlomezna-ocel-hss-co81/>
34. LISS. *O společnosti* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.liss.cz/o-spolecnosti.php>
35. LISS. *Katalog povlaků* 38 stran. [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.liss.cz/files/katalog_povlaku.pdf
36. *Dílčí zpráva k projektu č. 456* Brno: Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie [online]. 16 s. [cit. 2017-05-20] [vid. 25. května 2015] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Vybaveni_CNC_KISTLER_JC.pdf
37. TAYLOR – HOBSON. *Surtronic S-100 Series Surface Roughness Tester* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.taylor-hobson.com/products/15/107.html#Surtronic-S-100-Series-Surface-Roughness-Tester>
38. JANKOVIČ, Robert. *Trvanlivost povlakovaných rezných nástrojů*. Disertační práce. TU Bratislava-FM, Ústav materiálové techniky, 2005. 120 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
CVD	Chemical Vapour Deposition (chemické napařování)
HSS	High speed steel (rychlořezná ocel)
HSS Co8	Rychlořezná ocel s 8 % kobaltu
HV	Jednotka tvrdosti dle Vickerse
HRC	Jednotka tvrdosti dle Rockwella
NO	Nástrojové oceli
PVD	Physical Vapour Deposition (fyzikální napařování)
SK	Slinutý karbid
S-N-O	Stroj-Nástroj-Obrobek
TZ	Tepelné zpracování

Symbol	Jednotka	Popis
A_{Di}	[mm ²]	Jmenovitý průřez třísky
C_{Fc}	[-]	Materiálová konstanta pro výpočet řezné síly
D	[mm]	Průměr frézy
F	[N]	Síla
F_c	[N]	Řezná síla
F_{ci}	[N]	Řezná síla na jednom zubu
F_{cN}	[N]	Normálová řezná síla
F_f	[N]	Posuvová síla
F_{fN}	[N]	Posuvová normálová síla
F_p	[N]	Pasivní síla
F_x	[N]	Síla v ose x
F_y	[N]	Síla v ose y
F_z	[N]	Síla v ose z
KT	[mm]	Hloubka výmolu na čele
KV_y	[mm]	Radiální opotřebení špičky nástroje
VB	[mm]	Šířka fazetky na hřbetě
a_e	[mm]	Radiální šířka záběru
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří

f_z	[mm]	Posuv na zub
h	[mm]	Tloušťka třísky
k_c	[MPa]	Měrná řezná síla
l	[mm]	Délka dráhy nástroje (šířka polotovaru)
l_n	[mm]	Délka nájezdu
l_v	[mm]	Délka výjezdu
n	[min^{-1}]	Otáčky
t_{AS}	[s]	Jednotkový strojní čas
v_c	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Řezná rychlost
v_f	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Posuvová rychlost
z	[-]	Počet zubů frézy
κ_r	[°]	Úhel nastavení ostří
φ	[°]	Úhel mezi vektory

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Dodací list materiálu
Příloha 2	Hodnoty průměrné jakosti povrchu Ra a Rz
Příloha 3	Hodnoty průměrného potřebení
Příloha 4	Třísky vzniklé při obrábění

PŘÍLOHA 1



Prezvemno spričevalo o preizkušanju
Abnahmepruefzeugnis / Inspection Certificate
EN 10204/3.1

Št./Nr./No.
A14-23246
Stran/Page/Seite 1/1

METAL RAVNE d.o.o.
Koroška cesta 14
2390 Ravne na Koroškem
Slovenija/Slovenia

TEL.: +386 2 870 70 21
FAX.: +386 2 870 70 22

Znak proizvajalca/Zeichen des Herstellers/Mark of the Manufacturer



Naročnik/Besteller/Purchaser

**KOVINTRADE MEDNARODNA TRGOVINA D.D. CELJE
MARIBORSKA CESTA 7**

Datum/Datum/Date

26.11.2014

Odpremnica/Lieferschein/Delivery Note

03-14-73611

**3000 CELJE
SLOVENIJA**

Št.naročila/Bestell Nr./Order No.
4510091532/4

Int.nar./Unsere Auftrag Nr./Works Order No.
N14-04515/001

Predmet/Gegenstand/Subject
Forged bar Unmachined

Kvaliteta/Stahlmarke/Grade of steel
1.2842

Term. obd./Waermebehandlung/Heat treatment
Soft annealed

Standard/Anforderungen/Requirements
EN ISO 4957

Načrt/Zeichnung/Drawing
605 x 305 x 3000 ±500 mm DIN 7527/6 Flat

Kos/Stk/Pcs
1

Masa/Masse (kg)
5950

Št. šarže/Schmelze Nr./Heat No.: **97914**

Kemijska sestava/Chemische Zusammensetzung/Chemical Composition (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	V
0,89	0,22	1,92	0,019	0,006	0,34	0,08

Trdota materiala/Haerte von Material/Hardness of material: **(180-190) HB**

Grain size ASTM E112: **8-9**

Nonmetallic inclusion ASTM E45-met A: **At=0;Bt=0;Ct=0;Dt=1;Ad=0;Bd=0;Cd=0;Dd=0,5;**

Microstructure SEP 1520(tab.2): **1;**

Microstructure SEP 1520(tab.3): **0**

Opomba/Bemerkung/Note

The material was controlled by identity.

The bars were controlled by Ultrasound method acc.to SEP 1921:3:D/d and are suitable.

The material is in accordance with the required properties

sij group
Kontrola
Pruefstelle
Inspection



Način pretaljevanja
Erschmelzungsart
Steelmaking process
E+VAD

Način litja
Gießart
Method of casting
Ingots


Quality Control

PŘÍLOHA 2

Rz [μm]					
Průjezd	Čas obrábění [min]	A	B	C	D
1	0,60	18,04	25,1	13,4	11,37
5	3,02	13,03	18,57	13,23	14,6
10	6,03	15,23	16,23	13,83	14,07
20	12,07	14,57	16,80	14,30	14,30
30	18,10	23,03	12,27	15,83	15,83
40	24,13	22,13	11,67	22,27	14,17

Ra [μm]					
Průjezd	Čas obrábění [min]	A	B	C	D
1	0,60	3,41	4,5	3,13	2,74
5	3,02	2,38	3,44	3,19	2,95
10	6,03	2,66	3,4	3,12	2,17
20	12,07	3,27	3,25	3,36	2,01
30	18,10	4,86	2,54	3,21	3,21
40	24,13	5,09	2,04	4,19	2,28

PŘÍLOHA 3

VB [mm]				
Čas obrábění [min]	A	B	C	D
0	0	0	0	0
0,60	0,017	0,013	0,012	0,012
3,02	0,038	0,032	0,032	0,033
6,03	0,072	0,042	0,042	0,041
12,07	0,112	0,082	0,058	0,058
18,10	0,138	0,098	0,078	0,079
24,13	0,168	0,107	0,087	0,107

PŘÍLOHA 4



Třísky od nástroje bez povlaku (A)



Třísky od nástroje s povlakem nACo® (B)



Třísky od nástroje s povlakem AlTiN (C)



Třísky od nástroje s povlakem AlTCrN (D)