



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE PVD POVLAKŮ PRO FRÉZOVÁNÍ

APPLICATION OF PVD COATINGS FOR MILLING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN MATUŠKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Matuška

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

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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:

Aplikace PVD povlaků pro frézování

v anglickém jazyce:

Application of PVD coatings for milling

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza tvrdých povlaků pro frézování z pohledu fyzikálně-mechanického namáhání břitů při vybraných operacích frézování.

Cíle diplomové práce:

1. Úvod
2. Rozbor problému
3. Integrace poznatků pro volbu povlaků pro různé technologické aplikace.
4. Verifikace poznatků.
5. Diskuze.
6. Závěr.

Seznam odborné literatury:

1. CIHLÁŘOVÁ, P., PÍŠKA, M. Řezivost HSS fréz vyráběných metodou práškové metalurgie. In Sborník odborné konference Frézování III. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 2003, ISBN 80-214-2436-2, s. 159-170.
2. CSELLE, T. With High Performance Machining and Flexible Coating. In Gorham Conference. Cutting Tools and Machining System, May 21-23, 2001, Atlanta, GA, USA.
3. CSELLE, T., HOLUBAR, P. Driving forces of today's manufacturing technology. In Sborník odborné konference Frézování III. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 2003, ISBN 80-214-2436-2, s. 33-62.
4. DAVIS, J.R. Tool Materials. ASM Specialty Handbook. ASM International, Materials Park, Ohio, 1998, 2nd. ed., pp. 501, ISBN: 0-8170-545-1.
5. FREMUNT, P., KREJČÍK, J., PODRÁBSKÝ, T. Nástrojové oceli (odborná kniha). Dům techniky Brno, 1. vyd. 1994, 230 s.
6. HUMÁR, A. Trendy vývoje materiálů pro řezné nástroje. In Sborník odborné konference Frézování III. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 2003, ISBN 80-214-2436-2, s. 5-14.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 19.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o vlivu PVD povlaků na změnu trvanlivosti nástroje. Teoretická část se zabývá úpravami nástrojů před procesem povlakování. Na tuto část navazuje popis specifických vlastností deponovaných vrstev a jejich měření. Výčet a specifikace vybraných způsobů nanášení PVD povlaků a stručný popis výhod a nevýhod jednotlivých metod. Druhá část práce je soustředěna na experiment, ve kterém bylo měřeno silové zatížení nástroje, měnící se v závislosti na opotřebení. Byly srovnávány čtyři krátké frézy čtyřbřité, s povlakem i bez povlaku. Jednalo se o nástroje vyrobené z rychlořezné oceli konvenčním způsobem a práškovou metalurgií. Frézování probíhalo sousledně a nesousledně. Vyhodnocením výsledků experimentu bylo potvrzeno, že nástroje vyráběné práškovou metalurgií jsou efektivnější než klasické rychlořezné oceli.

Klíčová slova

HSS, fréza, PVD, povlakování, trvanlivost

ABSTRACT

This dissertation treats of the influence of PVD coats to a change of tool lifetime. The theoretical part of the dissertation describes the adjustment of tools before the process of coating. Following part describes the specific properties of deposited layers of the coating and its measuring. There is also the enumeration and specification of selected ways of depositing PVD coats and brief description of its advantages and disadvantages. Second part of the dissertation is focused on an experiment with measuring of the tool force loading and its change depending to the tool wear. There are compared four short four-edged milling cutters with a coat and as well without it. Those tools were made of high speed steel by the conventional way and also by the powder metallurgy. Milling operation was done by down and up milling

technique. The evaluation of the experimental results for powder metallurgy tools confirmed that these tools are advantageous compared to the standard high speed steel tools.

Key words

HSS, milling cutter, PVD, coating, lifetime

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MATUŠKA, Martin. *Aplikace PVD povlaků pro frézování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 75s., 0 příloh. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: **Aplikace PVD povlaků pro frézování** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 28. 5. 2010

.....

Bc. Martin Matuška

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za trpělivost a ochotu při vypracovávání diplomové práce. doc. Ing. Antonu Humárovi, CSc., Ing. Josefu Sedlákovu, Ph.D. za cenné připomínky.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	6
Poděkování.....	7
Obsah	8
1 Úvod	11
2 Rozbor problematiky.....	12
2.1 Nástroje a PVD povlaky	12
2.1.1 Historie PVD	12
2.1.2 Vznik povlakového systému.....	12
2.2 Mechanická úprava nástrojů před PVD povlaky.....	13
2.2.1 Odmaštění	13
2.2.2 Mokrý čištění.....	13
2.2.3 Pískování	14
2.2.4 Mikroúprava břitů	14
2.3 Důležité vlastnosti PVD povlaků a jejich měření	17
2.3.1 Tvrdost.....	17
2.3.2 Tloušťka	18
2.3.3 Drsnost	19
2.3.4 Adheze.....	19
2.3.5 Kluzné vlastnosti	20
2.3.6 Odolnost vůči oxidaci	20
2.3.7 Chemická stabilita.....	21
2.3.8 Tepelná stabilita.....	21

2.4	Způsoby nanášení PVD povlaků	21
2.4.1	Naprašování.....	22
2.4.2	Napařování	25
2.5	Cíl diplomové práce	28
3	Integrace poznatků	29
3.1	Charakteristika jednotlivých PVD povlaků.....	29
3.2	Materiál obrobku	30
3.3	Charakteristika experimentálních nástrojů	30
3.3.1	Materiál HSS Co8 (BÖHLER S500).....	31
3.3.2	Materiál HSSE – PM (ERASTEEL ASP 2030).....	32
3.4	Upnutí nástrojů.....	33
3.5	Obráběcí stroj	33
3.6	Měřicí zařízení	34
3.7	Řezné podmínky	35
3.8	Analýza měřených hodnot.....	36
3.9	Analýza opotřebení	38
3.9.1	Princip elektronového mikroskopu	38
4	Verifikace poznatků	40
4.1	Grafy silových průběhů HSSE – PM +AlTiN	40
4.2	Grafy silových průběhů HSSE – PM	49
4.3	Grafy silových průběhů HSS Co8 + AlTiN.....	55
4.4	Grafy silových průběhů HSS Co8	62
5	Diskuze	68
5.1	Rozbor průběhu sil při obrábění.....	68
6	Závěr	70

Seznam použitých zdrojů	71
Seznam použitých symbolů	75

1 ÚVOD

Průmyslové podniky na celém světě používají při výrobě strojních součástí z různorodých materiálů kovových i nekovových, různé metody obrábění, z nichž největší podíl tvoří soustružení, frézování a vrtání. K odebírání třísky a vytváření nových povrchů požadovaného tvaru, rozměrů a jakosti musí být k dispozici řezný nástroj, jehož břit má odpovídající houževnatost a současně vysokou tvrdost, která nesmí příliš poklesnout ani při vysokých pracovních teplotách.

Soudobé řezné nástroje pro strojní obrábění jsou vyráběny z rozmanitých materiálů – od nástrojových ocelí přes slinuté karbidy (bez povlaků i s tvrdými, otěruvzdornými povlaky), cermety, řeznou keramiku až po supertvrdé materiály (syntetický diamant a kubický nitrid boru). Tento široký sortiment materiálů je důsledkem dlouholetého a intenzivního výzkumu a vývoje v dané oblasti a má úzkou souvislost s rozvojem konstrukčních materiálů, které je třeba efektivně obrábět, i s vývojem nových obráběcích strojů, zejména s číslicovým řízením.

Žijeme v době stále častého skloňování názvu procesu tzv. High Speed Cutting (obrábění vysokými řeznými rychlostmi) u nejrůznějších aplikací - od obrábění hliníkových slitin až po frézování kalených ocelí. Při té příležitosti je však nutné uvědomit si nutnost komplexního, odborného a citlivého přístupu ke konkrétnímu případu technologie třískového opracování. I přes stále se rozšiřující podíl nových typů řezných destiček ze slinutých karbidů existují nadále progresivní technologie, kde přece jen slinuté karbidy nemohou zcela nahradit relativně houževnatější rychlořezné oceli. Dlouholetý cílený vývoj nových jakostí (chemické složení), technologií, primární metalurgie, sekundární metalurgie, režimů tepelného zpracování, či povrchových úprav, podstatně zvýšil užité hodnoty rychlořezných ocelí.^{1,2}

2 ROZBOR PROBLEMATIKY

2.1 Nástroje a PVD povlaky

2.1.1 Historie PVD

V oblasti vývoje a využití PVD technologií nastalo několik zásadních zlomů. Především objev a komerční nasazení PVD technologie, založené na nízkonapěťovém oblouku spadá do přelomu 60. a 70. let minulého století. Dlouhou dobu se připravovaly pouze jednosložkové povlaky TiN. Později se začíná přecházet k povlakům vícesložkovým TiCN. Teprve s nástupem povlaků TiAlN počátkem 90. let dochází k další revoluční změně. Povlaky na bázi TiAlN poskytují vysokou tvrdost a tepelnou odolnost. Následující zásadní změna byla příprava tzv. nanokompozitních povlaků na bázi TiAlSiN. Ty sice průmyslově připravovala firma SHM od r. 1995, ale do širšího povědomí se tyto povlaky dostaly až počátkem nového tisíciletí. Tyto povlaky díky velmi vysoké tvrdosti, mluvíme o supertvrdých materiálech, tepelné a oxidační odolnosti nad hranicí odolnosti samotných substrátů, přinesly možnost použití některých řezných nástrojů tam, kde doposud třískové obrábění nebylo možné. Dnes je tato rodina nanokompozitních povlaků rozšířena o povlaky CrAlSiN a méně známé TiSiN.

Vedle těchto velmi tvrdých povlaků se v 1. polovině 90. let vyvíjely kluzné povlaky. O něco později jsou představeny povlaky Diamond Like Carbon (DLC) s vyšší tvrdostí, ale nedostatečnou tepelnou odolností. Kolem roku 2006 jsou na trhu představovány různé verze DLC povlaků s vyšší tepelnou odolností i tvrdostí. Delší dobu se hovoří o PVD povlacích na bázi oxidů, především Al_2O_3 . Některé firmy nabízejí komerčně tyto povlaky, ale skutečnost je taková, že jde zatím pouze o kompromisní řešení s ohledem buď na bázi oxidu, nebo jeho složení, které doprovází další kovový prvek. Tady současný vývoj a komerční nasazení povlaků zatím končí.^{3,5}

2.1.2 Vznik povlakového systému

Před nanesením povlaku na nástroj musí být jeho povrch velice dobře očištěn. Toto čištění je prováděno v několika fázích, v jejichž průběhu je

nástroj důkladně očištěn, odmaštěn a prochází vakuovou komorou, kde dochází k odstranění několika nanometrů z jeho povrchu. Po dosažení maximální kovové čistoty je nástroj zahřát na požadovanou teplotu.

Tvorba vrstvy samotné je dána možnostmi povlakovacího zařízení a zkušeností obsluhy. Kotvení vrstvy může probíhat částečnou modifikací povrchu, implantací částic, nebo tvorbou mezivrstvy zvyšující adhezi vrstvy k nástroji. Základním parametrem celého PVD procesu povlakování, je již zmiňovaná adheze. Při nanášení povlaku kteroukoliv metodou dochází k pohybu částic na povrchu. Pohyb částic po povrchu nástrojů je žádoucí z hlediska rovnoměrnosti vrstvy. Je ovlivňován teplotou povrchu a energií částic. Po zakotvení probíhá růst vrstvy dle požadavků na výsledné vlastnosti. Jedno, nebo vícevrstevné povlaky s jednoduchou či gradientní strukturou, různé tloušťky atd.

Závěr povlakovacího procesu spočívá v ochlazení nástrojů pod teplotu oxidace oceli, tedy pod 200 °C a vyjmutí z komory.¹⁵

2.2 Mechanická úprava nástrojů před PVD povlaky

2.2.1 Odmaštění

Odstranění konzervačních a jiných mastných látek z povrchů nástrojů bylo dříve prováděno pomocí benzínu a petroleje. V průběhu času byly tyto neekologické látky nahrazeny průmyslovými odmašťovacími látkami na bázi ropných derivátů s vlastnostmi odpovídajícími přísným ekologickým normám. Odmašťovací prostředky obsahují tenzidy a dearomatizované uhlovodíky, které zajišťují dobrou smáčivost a zabraňují nadměrnému odpařování. Odmaštění je prováděno v běžných odmašťovacích zařízeních, která jsou volena v závislosti na potřebě kapacity.⁷

2.2.2 Mokrý čištění

Představuje kombinované metody využívající oplachy, tlakové oplachy, ultrazvuk, elektrochemické metody, vakuové sušení, resp. odpaření těkavých kapalin. Nejčastěji používané jsou kapalné čisticí prostředky, které se dávkuje přímo do mycí lázně. Čištění probíhá v alkalickém prostředí (roztoky hydroxidu

sodného nebo draselného). Malé přísady smáčedel popřípadě kyselin citronové či fosforečné, zvyšují odmašťovací účinek. Některé linky pracují s oddělenými oplachovými lázněmi zásaditého a kyselého charakteru. Čistící lázně pracují s demineralizovanou vodou.

Po takto provedeném čištění je nutné oplachy odstranit zbytky předešlých lázní a očištěný povrch chránit pasivátory. Nejčastěji jsou použity krátkodobé a to s dobou působnosti do 2 dnů. Je nutné zabezpečit, aby povrch, na který má být deponována vrstva, byl zbaven nejen nečistot, ale i pasivátorů.

Kvalitní povrch bez map je zajištěn rychlým osušením smáčených povrchů. K tomu jsou používány metody založené na odstředění a odpaření zbytkové kapaliny na vzduchu či ve vakuu.⁷

2.2.3 Pískování

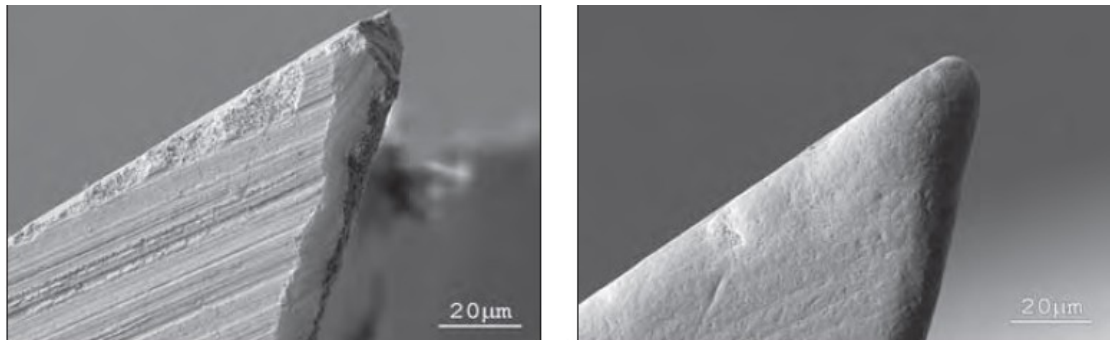
Respektive mikropískování, je vhodná průmyslová metoda pro případ sériové výroby substrátů nebo pro speciální případy. Pískováním lze odstranit pevně ulpívající nečistoty na povrchu, případně i nečistoty v mírně pórovitém povrchu. Jedná se o nebroušené slinované plochy HM materiálů nebo opotřebených a neobnovených ploch přebroušovaných nástrojů. Jako vhodné médium se používá abrazivo SiC nebo Al₂O₃. Velikost abrazivních zrn se pohybuje od 20 do 100 μm. Technologie pískování musí vždy respektovat charakter nástroje, jeho funkční plochy a bříty. Volba parametrů pískování a řešení automatizace se do značné míry odvíjí ze zkušeností. Bez dlouhodobých experimentů nelze zabránit případným negativním vlivům – nevhodné zaoblení hran, odpískování měkčích fází, nebo zmatnění zrcadlových dekorativních či upínacích ploch.⁷

2.2.4 Mikroúprava břitů

Ukazuje se však, že ovlivnění mikrogeometrie břitů nástrojů má zásadní vliv jak na životnost nástroje, tak i na způsob otěru a řezné síly vznikající při obrábění.

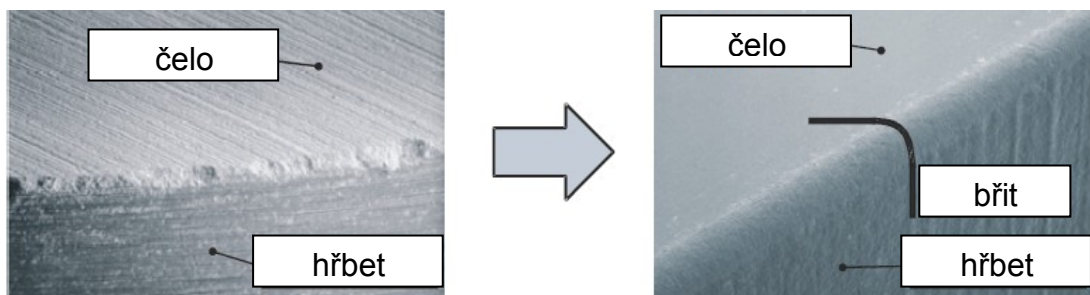
Je patrné, že výběr vhodné techniky úpravy břitů nástrojů souvisí s objemem nástrojů i jejich tvarovou rozmanitostí. Konečný výběr samozřejmě také ovlivňuje i konečná cena zaváděné technologie. Vzhledem k tomu, že v případě úpravy „Leštění v ruce“ se výsledek odvíjí od zkušenosti konkrétního pracovníka, není tato technika příliš vhodná. Úprava mikrogeometrie nástroje pomocí technologie kartáčování, přestože je poměrně rozšířená, není pro následné povlakování vhodnou technikou. Vedle mnoha výhod je zde ovšem velmi podstatná nevýhoda, spočívající v nalepování materiálu vláken na břity nástrojů. Plast je běžnými způsoby čištění obtížně odstranitelný. Z tohoto důvodu je vyloučeno používání kartáčování jako technologie upravující břity nástrojů před povlakováním.

Leštění v granulátech s abrazivní pastou je z tohoto pohledu metodou, která je dobře reprodukovatelná. Jako granulát může být použita široká škála materiálů, a to od granulátů na bázi oxidů některých kovů až po keramická tělíska. Touto úpravou dojde k zaoblení břitů a následnému zlepšení adheze PVD vrstev na břitech nástrojů. Po vybroušení nástrojů jsou břity většinou nerovnoměrné, přibližně v měřítku použitých brusných zrn. V důsledku fluktuací v geometrii broušení, kvalitě substrátů, kvality obsluhy CNC brusek a brusných kotoučů mohou nerovnoměrnosti na břitech působit vážné znehodnocení jeho řezného výkonu. V případě následné aplikace PVD povlaku může docházet na ostrých přerušovaných hranách k oprýskání povlaku. Tomuto velmi účinně zabrání právě omílání v různě koncipovaných omílacích zařízeních s vhodně voleným granulátem a abrazivem.^{4, 5}



Obr. 2.1 Eliminace odlupování povlaku na ostrých přerušovaných hranách se dosahuje omíláním břitů nástrojů před povlakováním ⁴

Omílací zařízení s planetovým pohybem jsou vhodná zejména pro axiální nástroje. Výsledný efekt se projeví v dobré adhezi PVD vrstvy na břitech nástroje a ve výsledném výkonu či životnosti nástroje. Metodu mikroupravy břitů lze provádět i po aplikaci PVD vrstvy. ^{4, 5}



Obr. 2.2 Břit nástroje před (vlevo) a po (vpravo) mikroupravě ²⁹

Při této následné úpravě jsou odstraňovány makročástečky z povlaku a snižuje se drsnost. Je však třeba pečlivě volit jak dobu úpravy, tak i typ média. Byly prováděny rozsáhlé řezné zkoušky, u kterých se zjišťoval vliv parametrů omílání na výslednou životnost nástrojů, ale i na řezné síly vznikající při frézování. Ve všech případech se pozitivně projevila úprava řezné hrany omíláním. V důsledku došlo k zaoblení řezné hrany na rádius cca 10 μm a tímto „definovaným“ otupením došlo i ke snížení řezných sil. To samozřejmě vedlo v konečných důsledcích ke snížení teploty v řezu a následnému zvýšení životnosti nástrojů. ^{4, 5}

2.3 Důležité vlastnosti PVD povlaků a jejich měření

Aplikace různých metod pro charakterizaci, umožňuje pochopení souvislostí mezi mechanickými vlastnostmi, chemickým složením a strukturou materiálů.¹³

2.3.1 Tvrdost

Pro tenké vrstvy i ostatní materiály je tvrdost definována jako „odolnost proti pronikání cizích předmětů“. Běžný způsob opotřebení nástrojů je dán abrazivním otěrem. Právě proto je vysoká tvrdost základním parametrem otěruvzdorných vrstev.^{6, 13, 24}

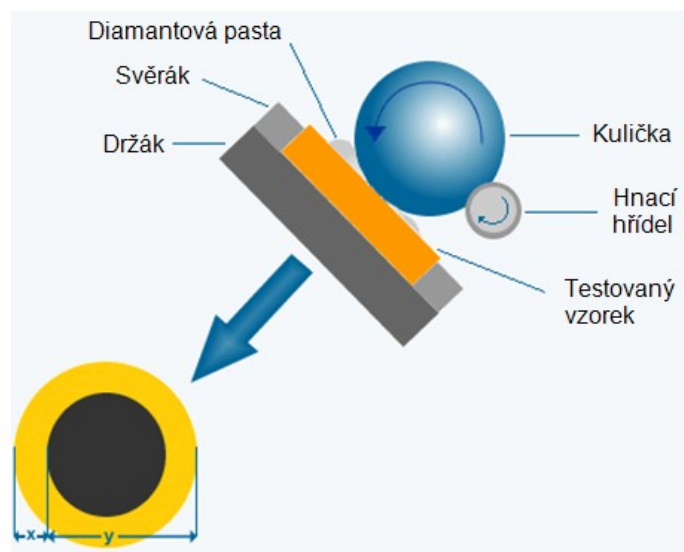
Tab. 2.1 Tvrdosti nejběžnějších vrstev⁶

Vrstva	Tvrdost [GPa]
TiN	23
TiCN	30
CrN	17
TiAlN	33
DLC	25
TiAlSiN	45

Běžná tloušťka PVD vrstev je pouze několik mikrometrů. Z tohoto důvodu se volí velikost zátěže při měření tvrdosti vrstev v řádu desítek mN. Důvodem použití tak nízkých zátěžných sil spočívá v nutnosti měření tvrdosti pouze samotné vrstvy bez ovlivnění materiálu, na kterém je vrstva nanesena. Hloubka vtisku při takové zátěži je pod 0,5 μm . Tímto je zabezpečeno, že měření tvrdosti vrstvy není ovlivněno vlastnostmi podkladového materiálu. Vzniklé stopy je velmi obtížné vyhodnocovat pomocí mikroskopu, proto se využívají speciální přístroje (mikrotvrdoměry), které souběžně se zatěžováním hrotu měří hloubku jeho pronikání do vrstvy s přesností na jednotky nm. Přístroje využívající jiné principy měření jsou zatíženy velkou chybou způsobenou rozdílem mezi maximální hloubkou vtisku a skutečně zjištěnou velikostí zbytkového vtisku. Tvrdosti vrstev se udávají v GPa.^{6, 13, 24}

2.3.2 Tloušťka

Z hlediska praktické aplikace je volba tloušťky povlaku na břitech řezných nástrojů jednou z nejdůležitějších charakteristik. Ta může v konečném důsledku ovlivňovat trvanlivost nástroje i řezné síly během obrábění. Zjednodušeně řečeno – tloušťka povlaku musí být opravdu přizpůsobena předpokládanému použití obráběcího nástroje. Např. optimální vrstva na závitnících se pohybuje v rozmezí 1 až 2 μm a je výrazně nižší než u odvalovacích fréz, kde tloušťka vrstvy na břitu nástroje může být až 8 μm . Tloušťka vrstvy na břitu nástroje se výrazně liší od tloušťky vrstvy na rovných nebo válcových plochách. Současně je ovlivňována průměrem nástroje a způsobem naložení svlakovací komory. V současnosti neexistuje pro vyhodnocení přesná, jednoduchá a zároveň nedestruktivní metoda. Pro měření rovinných částí nástrojů se využívá tzv. kalotester. Princip měření je jednoduchý. Z průměru kuličky a mikroskopem změřených kulových vrchlíků je možné výpočtem stanovit tloušťku nanesené vrstvy. Toto měření je z důvodů vyšší přesnosti vhodné provádět na vyleštěných etalonech. Pro stanovení hloubky vrstvy na břitech se používá klasická metalografie založená na leštění vybrané části substrátu.^{6, 8, 14}



Obr. 2.3 Kalotest - pomocí rotující kuličky s diamantovou pastou dochází k proleštění nanesené vrstvy¹⁴

2.3.3 Drsnost

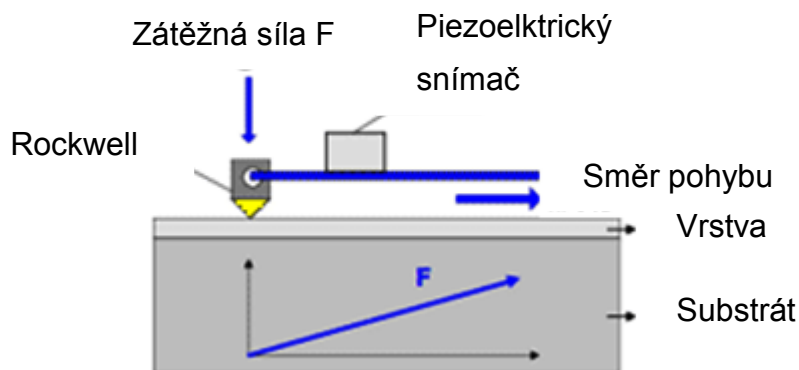
Drsnost je definována jako souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Při nanášení PVD vrstev je výsledná drsnost ovlivněna kvalitou opracování nástroje a povlakem. Při měření drsnosti se neuvažují vady povrchu.

Zdrojem zvýšené drsnosti vrstev jsou makročástice, které vznikají během technologického procesu povlakování. Drsnost povlaku zvyšuje tepelné a mechanické namáhání břitů. Tento negativní jev se snaží výrobci eliminovat úpravou technologie povlakování, případně dodatečnou úpravou nástrojů po povlakování. Měření je vhodné provádět na vyleštěných substrátech s drsností R_a 0,01 – 0,02 μm .^{6,24}

2.3.4 Adheze

K maximálnímu využití potenciálu otěruvzdorné vrstvy dojde pouze v případě, že je perfektně zajištěna její adheze k nástroji. Bez dokonalé přípravy nástroje před povlakováním nelze vyrobit kvalitní povlak.

Standardní metodou pro vyhodnocování přilnavosti povlaků je tzv. scratch-test. Pro měření se využívá principu postupně se zvyšující zátěžné síly na diamantový Rockwellův hrot při současném pohybu špičky hrotu po měřené vrstvě. Běžně se používá zátěžná síla v rozsahu 20 – 120 N. Při měření vrstvy je detekována akustická emise na hrotu, která se mění při odtržení vrstvy. To odpovídá určité hodnotě v N.^{6, 24}



Obr. 2.4 Princip měření²⁴

Další z možností vyhodnocení je pomocí mikroskopu. Na stopě vytvořené hrotem se odečte místo, kde došlo k odtržení vrstvy. Při lineární závislosti dráhy na zátěži lze pak snadno určit kritickou hodnotu.

Hodnota adheze větší než 60 N zajišťuje, že při běžných aplikacích nedojde k uvolnění vrstvy. Adheze povlaku závisí také na jeho celkové tloušťce a podkladovém materiálu.^{6, 24}

2.3.5 Kluzné vlastnosti

Snížením frikčních sil, důsledkem povlaku, se výrazně omezuje tepelné zatížení nástroje.

Pro zjištění kluzných vlastností je používaným standardem v laboratoři tzv. pin-on-disk, resp. ball-on-disk test. Testovaná vrstva je nanesena na zkušební vyleštěný vzorek a následně umístěna na otočný stolek. Hrot, respektive kulička definovanou silou tlačí na rotující vzorek s testovaným povlakem. Měří se otěr kuličky, frikční koeficient, otěr vrstvy, profil otěru a další veličiny. Při měření pin-on-diskem se používá zátěžné síly v řádu jednotek N. Teplota generovaná při běžných řezných podmínkách je o několik set stupňů vyšší než při testech pin-on-disku. Z toho vyplývá, že tato laboratorní metoda neodpovídá skutečnému zatížení při obrábění, lze ji však použít pro získání představy o kluzných vlastnostech.⁶

2.3.6 Odolnost vůči oxidaci

K opotřebení vrstvy dochází i v důsledku oxidace. Je důležité rozlišovat oxidaci hloubkovou a povrchovou. Při povrchové oxidaci dochází k pasivaci povrchu, čímž se může vytvářet bariéra proti další oxidaci. Při hloubkové oxidaci obvykle dochází k destrukci vrstvy. Ta je provázena poklesem tvrdosti, neboť se vytvářejí jiné typy mřížkových vazeb. Každá PVD vrstva je charakterizována maximální teplotou použití, jejíž maximální hodnota je dána právě odolností proti oxidaci. K měření odolnosti vůči oxidaci se ve většině případů používá gravimetrická metoda, při které se hodnotí změna hmotnosti vrstvy v závislosti na teplotě účinkem vzdušného kyslíku. Podmínkou je, že testovaný vzorek musí být celoplošně pokryt zkoumanou vrstvou.⁶

2.3.7 Chemická stabilita

Popisuje odolnost vrstvy vůči chemické reakci s obráběným materiálem, zejména za vyšších teplot. Chemická stabilita vrstvy se může měnit s typem obráběného materiálu a změnou řezných podmínek. Ukázkovým případem je diamantová vrstva, jejíž chemická stabilita je naprosto nevyhovující při opracování ocelí a vynikající při obrábění neželezných materiálů.⁶

2.3.8 Tepelná stabilita

Povlak se vytváří za intenzivního iontového bombardování a je termodynamicky nestabilní. Při zvýšení teploty vlivem obrábění může docházet ke změně vnitřní struktury. Tyto charakteristiky, které se navenek projevují změnou mechanických vlastností, se spolehlivě vyhodnocují pomocí transmisní elektronové mikroskopie či rentgenové difrakce. Takové analýzy jsou velice náročné na přístrojové vybavení a je možné je provádět jen na specializovaných pracovištích.

Výše popsané vlastnosti povlaků a jejich měření jsou z hlediska praktického používání povlakovaných nástrojů nejdůležitější. S jejich pomocí lze poměrně spolehlivě určit optimální řezné podmínky a naopak.⁶

2.4 Způsoby nanášení PVD povlaků

Metodou PVD jsou povlaky vytvářeny za sníženého tlaku ($0,1 \div 1,0$ Pa) kondenzací částic, které jsou uvolňovány ze zdroje částic (terčů, targetů) fyzikálními metodami – rozprašováním nebo odpařováním. Některé metody využívají i klasický odporový ohřev. Uvolněné částice jsou ionizovány, reagují s atmosférou komory, kterou tvoří inertní (Argon) a reaktivní (Dusík) plyn, a záporným předpětím jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde se usazují ve formě tenkého homogenního povlaku.

Vrstva povlaku je vytvářena z jednotlivých dopadajících atomů. Atomy jsou na povrchu nejdříve zachyceny procesy sorpce, pohybují se po povrchu a potom jsou buď zachyceny trvalou vazbou, nebo zpětně uvolněny. Další dopadající atomy se díky pohyblivosti po povrchu mohou spojit vazbou s dříve zachycenými atomy a postupně tak vytvářet ionizované zárodky a ostrůvky

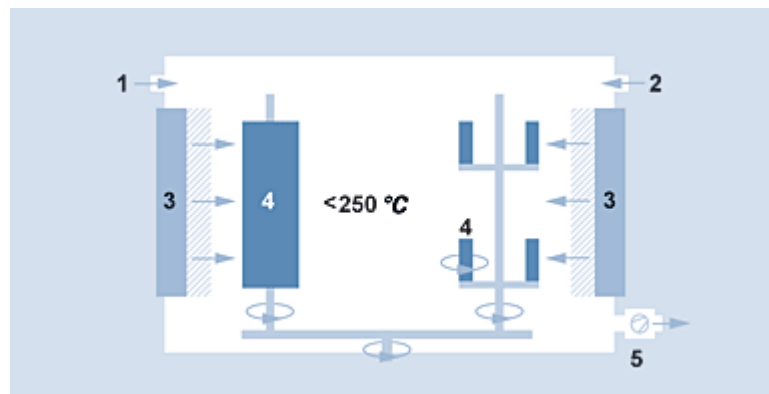
rostoucí vrstvy. Ty se potom spojují, až vytvoří souvislou vrstvu, která dále roste a zvětšuje svoji tloušťku.

K nevýhodám všech 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 nevytváří. Mezi výhody lze zařadit možnost povlakování ostrých hran.¹

2.4.1 Naprašování

Naprašování je depozice částic oddělených z povrchu zdroje fyzikálním odprašovacím procesem. Obvykle probíhá ve vakuu nebo při nízkém tlaku plynu (<0,7 Pa), kdy se odprašené částice dostanou na povrch substrátu bez kolize s molekulami plynu, v prostoru mezi zdrojem a substrátem. Může být prováděno i při vyšším tlaku, kdy jsou odprašené nebo odražené částice terče ohřívány srážkami s částicemi plynu předtím, než se dostanou na povrch substrátu.

Při reaktivním naprašování se díly, na které má být povlak nanesen, nejdříve ohřejí v komoře zařízení. Poté následuje iontové leptání ostřelováním argonovými ionty. Výsledkem je dokonale čistý kovový povrch bez atomárních kontaminací, to je důležitý předpoklad dobré přilnavosti vrstvy. Poté se na zdroj naprašovaného materiálu přivede záporné elektrické napětí. Elektrický výboj v plynu, který se takto zapálí, vytvoří kladné argonové ionty, které se urychlují ve směru k nanášenému materiálu a rozprašují ho. Rozprašené kovové částičky reagují s přiváděným reaktivním plynem, který obsahuje nekovovou složku pozdější tvrdé vrstvy. V důsledku toho se na substrátu sráží tenká, kompaktní vrstva požadované struktury a složení.^{1, 8}

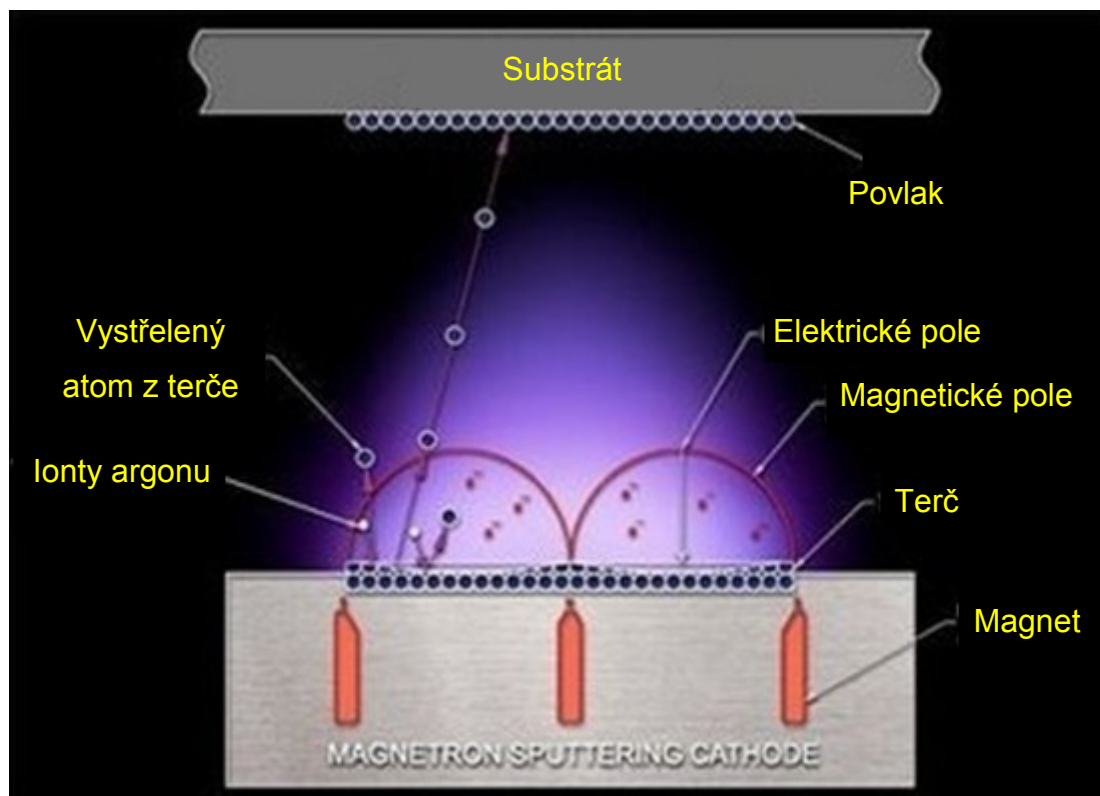
Obr. 2.5 Schéma reaktivního naprašování⁸

- 1) Argon
- 2) Reakční plyn
- 3) Planární magnetronový zdroj naprašovaného materiálu (nanášený materiál)
- 4) Nástroje
- 5) Vakuové čerpadlo

Touto metodou lze vyrábět tenké povlaky z těžkovitých materiálů bez požadavku ohřevu terče na vysokou teplotu, která je potřebná při odpařovacím procesu.^{1, 8}

2.4.1.1 Magnetronové naprašování

Magnetronové naprašování, je další z velice často používaných technologií nanášení PVD vrstev. Jedná se o plazmový proces, při kterém dochází k bombardování terčů naprašovaného materiálu ionty inertního plynu, zpravidla argonu, kterým je naplněna vakuová komora stroje. Tento plyn vytváří anodu. Pomocí vysokého napětí je vytvořen doutnavý výboj, díky němuž, dojde k urychlení iontů směrem k povrchu naprašovaného materiálu. Ionty Argonu jsou vystřelovány na terče naprašovaného materiálu a v důsledku tohoto jevu dochází k uvolnění atomů či molekul nanášeného materiálu.^{1, 10, 12}



Obr. 2.6 Schéma procesu magnetronového naprašování ¹⁰

Ve správnou chvíli je do komory přiveden reaktivní plyn nejčastěji acetylen nebo dusík a dochází k depozici materiálu povlaku na povrchu povlakovaného předmětu.

Existuje několik konfigurací magnetronového naprašování a to s válcovým a rovinným magnetronem. I když tato metoda umožňuje vysoké rychlosti naprašování, její širší využití je omezeno volbou materiálu terče a potížemi při jejich výrobě.

Výhodou magnetronového naprašování je velmi variabilní uspořádání. Lze odprašovat libovolný materiál, včetně slitin a nevodíčů. Rychlost, je ale nižší než u odpařování. Pro udržení výboje je nezbytný pomocný inertní plyn. Vytvořené povlaky neobsahují mikročástice, které se vyskytují u obloukového odpařování. Snadno lze nanášet povlaky tvořené více vrstvami různého chemického složení. Při této metodě je ionizován pracovní plyn a ne rozprašovaný materiál. ^{1, 10, 12}

Výhody naprašování:

- lze odprašovat a ukládat prvky, slitiny a chemické sloučeniny,
- odprašovaný terč je stabilním zdrojem par a má vysokou životnost,
- v některých uspořádáních může mít terč různé tvary, např. deska, prut, válec,
- velmi nízké zatížení tepelnou radiací,
- terč a substrát mohou být umístěny blízko sebe,
- depoziční komora může mít malý objem. ¹

Nevýhody naprašování:

- intenzita naprašování je ve srovnání s intenzitou tepelného odpařování nízká,
- terče jsou často drahé, využití materiálu je špatné,
- většina energie dopadající na terč se mění na teplo, které se musí odvádět,
- v některých případech je v plazmě aktivována plynová kontaminace, která znečišťuje povlak více než u napařování,
- velké vnitřní napětí v povlaku. ¹

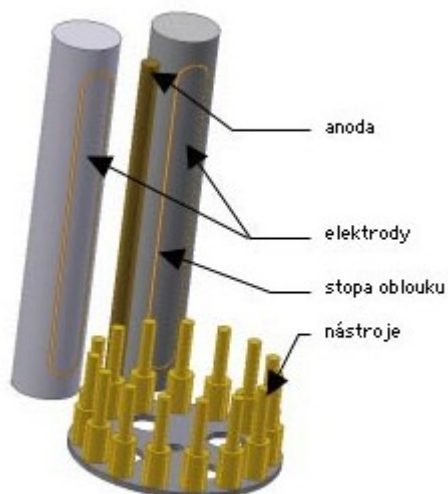
2.4.2 Napařování

Při napařovacích procesech je materiál odpařován z terčů, které jsou ohřívány ve vakuu. Odpařené atomy se před kondenzací na substrátu pohybují po nekolizních drahách, což vede k vytvoření povlaku s nerovnoměrnou tloušťkou. Tato vrstva je největší nad terčem a se zvětšující se vzdáleností se postupně ztenčuje. Objem a hmotnost odpařovaného materiálu jsou u odporových zdrojů malé, maximálně 1 g, při miskovém tvaru a u košíků několik gramů. ¹

2.4.2.1 Obloukové odpařování

Nízkonapěťový oblouk je výhodný pro svoji vysokou rychlost odpařování a vysokou ionizaci plazmatu. Velmi zajímavé jsou jeho parametry.

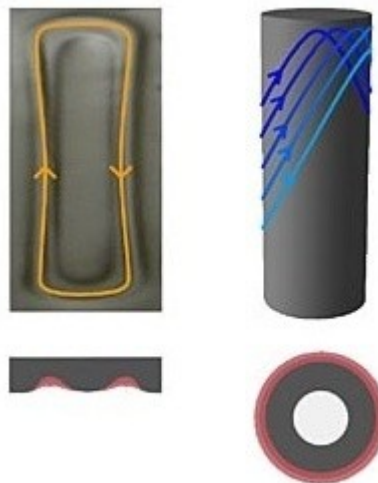
Hoří v místě katodové skvrny o průměru řádově 10 μm , kde dosahuje teploty cca 15 000°C. ^{1, 9, 11}



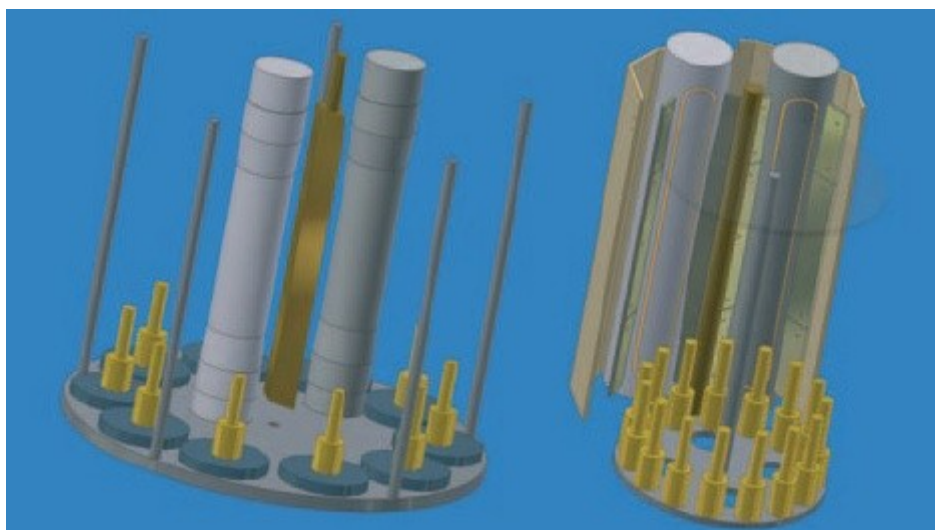
Obr. 2.7 Schéma PVD zařízení ⁹

Za těchto podmínek lze odpařit prakticky každý elektricky vodivý materiál. Princip povlakování lze velmi dobře přiblížit ze schématu PVD zařízení. Materiál je odpařován a zároveň ionizován obloukem z elektrod. Ionizovaný materiál je urychlovaný směrem k nástrojům záporným předpětím, které je na ně přiloženo. Cestou ionizuje ještě atomy plynné atmosféry (např. Dusík, Argon). Ionizované atomy po dosažení povrchu nástrojů vytváří povrchovými reakcemi vlastní deponovanou vrstvu.

Konvenční PVD zařízení jsou vybaveny tzv. planárními elektrodami (ploché, ve tvaru desek či malých kruhů) na kterých, při použití silného magnetického pole dochází k nadměrné a soustředěné erozi a k jejich podstatně dřívějšímu vyřazení z procesu. Tento problém lze velmi elegantně vyřešit pomocí rotujících válcových elektrod, jejichž „účinná plocha“ je v podstatě p-krát větší a díky rotaci nedochází ke zmíněné statické erozi. ^{1, 9, 11}

Obr. 2.8 Planární a válcový target⁹

Elektrody jsou v zařízení umístěny v páru a to buď ve středu komory, centrálně k povlakovaným nástrojům a nebo vně nástrojů např. ve dveřích komory. Různými hodnotami proudů na elektrody a jejich poměry lze měnit stechiometrii, rychlost růstu a částečně i drsnost vrstev bez fyzické výměny materiálu elektrod. Takto se připravuje základní struktura povlaků na úrovni – mono, multi a gradientních vrstev.^{1, 9, 11}

Obr. 2.9 Zařízení s centrálně a bočně umístěnými targety¹¹

Výhody obloukového odpařování:

- variabilní uspořádání (obdélníková, kruhová či jiná katoda v libovolné poloze),
- lze odpařovat všechny elektricky vodivé materiály,
- plazmový oblouk efektivně ionizuje odpařovaný materiál i reaktivní plyny,
- před depozicí mohou být ionty materiálu povlaku urychlovány na vysokou energii,
- nízké zatížení tepelnou radiací,
- reaktivní plyny jsou aktivovány plazmou, což zlepšuje procesy depozice,
- znečištění terče je mnohem menší než u reaktivního naprašování.¹

Nevýhody obloukového odpařování:

- lze odpařovat pouze elektricky vodivé materiály,
- vysoké zatížení tepelnou radiací,
- roztavené kapénky vyvržené z katody se mohou dostat do povlaku a vytvořit na jeho povrchu kuličky (dopadu mikročástic lze zabránit pomocí elektromagnetického filtru, který ale mnohonásobně snižuje rychlost depozice).¹

2.5 Cíl diplomové práce

Cílem této diplomové práce je po provedení teoretického rozboru problému zejména testování opotřebení povlakovaných HSS fréz (ze dvou rozdílných kvalit substrátů) pomocí rozboru silového zatížení v celé době jejich trvanlivosti.

3 INTEGRACE POZNATKŮ

3.1 Charakteristika jednotlivých PVD povlaků

TiN - základní a nejdéle používaná vrstva. Používá se pro obrábění nízkými řeznými rychlostmi a obrábění ocelí s nízkou pevností. Mikrotvrdotost od 20 do 25 GPa, barva zlatá. Je použitelný téměř ve všech aplikacích. Pokud uživatel není schopen přesněji popsat, proti jakým procesům hodlá tenké PVD vrstvy nasadit, i z ekonomických důvodů to bývá právě tento povlak, z něhož se vychází. Má výbornou odolnost vůči adhezivnímu opotřebením. Ve srovnání s nepovlakovanými nástroji vykazuje o 30-40% větší trvanlivost ostří. Výhodou TiN je dobrá elasticita a adheze. Většina povlakovacích středisek má právě s touto vrstvou největší zkušenosti. ^{15, 16}

TiAlN - univerzální povlak pro obrábění celé škály materiálů středních a vyšších pevností, středními a vyššími řeznými rychlostmi. Mikrotvrdotost 25 až 33 GPa, barva od růzovofialové po černošedou. V oblasti řezných nástrojů stále zvyšuje podíl na trhu na úkor ostatních vrstev, především TiN, i přes vyšší výrobní náklady. Má výbornou odolnost vůči vysokým teplotám, poměr tvrdosti a houževnatosti díky multivrstvé struktuře. Díky vyšší oxidační odolnosti a tvrdosti za vysokých teplot, nevyžaduje dokonalé chlazení. V současné době ideální pro vysokorychlostní obrábění. Jeho zajímavou vlastností je vytváření povrchové vrstvy Al_2O_3 , jež při řezu přispívá ke snížení tření, zvýšení difuzní odolnosti a zlepšení řezných vlastností. ^{15, 16}

TiCN - povlaky s vysokou odolností vůči otěru a s velmi nízkým koeficientem tření. Povlak je vhodný pro frézování ocelí se středním obsahem uhlíku, s nižší až střední pevností a pro frézování šedé litiny. Mikrotvrdotost 30 až 40 GPa, barva hnědočerná. Kvůli problematickému dosahování rovnoměrnosti, a to i u vakuových zařízení řízených počítači, stejně tak jako údržbě komory po provedení procesu, ustupuje tento povlak do pozadí zájmu. Povlak vykazuje dobrou houževnatost. Důležitým faktorem pro efektivní obrábění u tohoto povlaku je kvalitní chlazení. Dnes jej nahrazují především povlaky na bázi TiAlN v oblasti řezných nástrojů a zdokonalený TiN v oblasti

např. tažných nástrojů. Svoje využití si ale stále drží v oblasti dekorativních povlaků, kde je jeho hnědá až bronzová barva vyhledávána.^{15, 16}

ZrN - vlastností shodné s TiN, ovšem mnohem dražší. Užívá se především v medicíně pro svoji biokompatibilitu a při dekorativním povlakování, kde jeho barva je téměř nerozeznatelná od zlata (TiN připomíná spíše mosaz).¹⁵

AlTiN - povlak s velmi vysokou oxidační odolností vhodný pro náročné aplikace jako jsou frézování vysokými řeznými rychlostmi, popřípadě frézování bez chlazení. Povlak je vhodný například pro obrábění rychlořezných ocelí, termoplastů vyztužených vláknem, tvárné litiny, ocelí vysokých pevností, případně ocelí pro kování a materiálů se sklonem k nalepování.^{16,17}

AlTiCrN - povlak na bázi chromu s vysokým obsahem hliníku pro náročné frézování materiálů s vysokou odolností proti otěru za tepla. Aplikace náročné na oxidační odolnost.^{16,9}

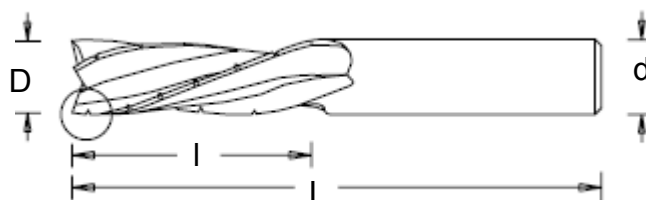
3.2 Materiál obrobku

Obráběným materiálem byla ocel 15 260.9. Jednalo se o Mn-Cr ocel vhodnou k zušlechťování. Je dobře tvárná za tepla, ve stavu žíhaném na měkko dobře obrobitelná. Vhodná pro velmi namáhané strojní součásti silničních motorových vozidel, čepy, pružiny, hřídele, vřetena, poloosy a pístnice. Tento materiál je obtížně svařitelný. Byl dodán opracovaný polotovar 45x90x200 mm.²¹

3.3 Charakteristika experimentálních nástrojů

Experiment byl proveden na čtyřech kusech krátkých, válcových, čelních fréz, s jedním břitem přes střed, dodaných firmou ZPS-FN, a.s., Zlín. Jedná se o dva kusy fréz HSS Co8 (katalogového označení 120518.100) průměru 10 mm stejné geometrie. Úhel stoupání šroubovice 30° a úhel čela 8°. Jedna fréza z této dvojice byla napovlakována povlakem AlTiN, který byl na nástroj nanesen firmou Liss a.s. Druhá dvojice HSSE-PM (katalogové

označení 120517.100) průměru 10 mm, stoupání šroubovice 30° a úhel čela 12°. Opět byl jeden nástroj z dvojice napovlakován povlakem AlTiN.



Obr. 3.1 Legenda parametrů frézy¹⁸

Tab. 3.1 Rozměry experimentálních fréz¹⁹

$\varnothing D$ k10	l	L	$\varnothing d$ k6	z
10	22	72	10	4



Obr. 3.2 Jeden z nástrojů (HSS Co8) použitý v experimentu od společnosti ZPS-FN, a.s., Zlín

3.3.1 Materiál HSS Co8 (BÖHLER S500)

Jedná se o ocel legovanou Co a Mo, která má vysokou tvrdost a zároveň je velice houževnatá. Vyniká svými řeznými vlastnostmi za vyšších teplot. Tento materiál je vhodný pro výrobu fréz, vrtáků, závitníků, protlačovacích nástrojů a nástrojů určených k práci za studena.²⁰

Tab. 3.2 Chemické složení HSS Co8²⁰

Chemické složení	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co
Obsah prvku [%]	1,10	0,50	0,25	3,90	9,20	1,20	1,40	8,00

Materiál je vyráběn konvenčním způsobem – tj. litím a tvářením při teplotách 1100 – 900 °C. Následuje žíhání na měkko, které probíhá při teplotách 770 – 840 °C. Z této teploty se materiál kontrolovaně ochlazuje a to po 10 – 20 °C za hodinu. Tvrdost po žíhání na měkko je pouze 280 HB. 600 – 650 °C je teplota, při které dochází k žíhání na odstranění pnutí. Následuje kalení. Kalení probíhá za austenitizační teploty 1170 – 1210 °C. Této teploty je dosaženo stupňovitým ohřevem. Dolní hranice austenitizační teploty se využívá pro tvarově složitější nástroje a horní hranice pro tvarově jednodušší. Nástroje určené k obrábění za studena, lze kalit za nižších teplot, což pozitivně ovlivňuje jejich houževnatost. Při kalení je doporučena výdrž na austenitizační teplotě alespoň osmdesát sekund, ale ne víc jak 150 sekund. Po překročení této doby by mohlo dojít k poškození materiálu. Po kalení musí následovat ohřev na popouštěcí teplotu. Na této teplotě by měl materiál setrvat jednu hodinu na každých dvacet milimetrů tloušťky, avšak ne déle, než dvě hodiny. Ochlazování probíhá na vzduchu. Popouštění probíhá ve třech stupních a lze dosáhnout tvrdosti 67 – 69 HRC.²⁰

3.3.2 Materiál HSSE – PM (ERASTEEL ASP 2030)

Jedná se o rychlořeznou ocel vyráběnou práškovou metalurgií a to následujícím způsobem. Vysoce čistá tekutá ocel je rozprašována pomocí dusíku na velice jemné částičky. Za podmínek velice rychlého a intenzivního ochlazování, kterým jsou tyto částice vystaveny, dochází k výrazné redukci velikosti karbidů i jejich růstu. Vzniklý ochlazený prášek je prosíván a následně ve vakuu plněn do kapslí. Následuje izostatické lisování při talku 1000 bar a teplotě 1200 °C. Za těchto podmínek dochází v místech styku částic ke vzniku nových spojení. Takto se z velice čistého ocelového prášku stává homogenní a zcela isotropní produkt. Následným kováním a válcováním je dosaženo bezpórovitého povrchu a velice jemné karbidické struktury. Chemické složení udává (tab. 3.3).^{22, 23}

Tab. 3.3 Chemické složení HSSE-PM ²²

Chemické složení	C	Cr	Mo	W	Co	V
Obsah prvku [%]	1,28	4,20	5,00	6,40	8,50	4,10

Tepelné zpracování oceli probíhá v několika fázích. Nejprve je provedeno žíhání na měkko – provádí se v ochranné atmosféře při 850-900°C po dobu třech hodin, následuje pomalé ochlazování 10°C/hod na teplotu 700°C a poté se dochlazuje na vzduchu. Žíhání na odstranění pnutí – probíhá při 600-700°C s výdrží dvou hodin na této teplotě, následuje pomalé ochlazování na teplotu 500°C. Kalení – probíhá v ochranné atmosféře, nutný přehřev a to ve dvou stupních 450-500°C a 850-900°C, teplota austenitizace je volena v závislosti na požadované tvrdosti. Při kalení je nutné ochladit až na teplotu 45-50°C. Popouštění – probíhá ve třech cyklech a to vždy nejméně jednu hodinu. Mezi každým cyklem nutnost ochladit až na teplotu okolí. Tato ocel je vhodná pro nanášení povlaku metodami PVD i CVD. ^{22, 23}

3.4 Upnutí nástrojů

Nástroje byly postupně upínány do upínacího pouzdra firmy RÖHM SK 40x10 576032 a dotaženy šestihranným klíčem. Takto sestavený komplet byl pneumaticky upnut do vřeteníku obráběcího stroje. V průběhu experimentu nebylo pozorováno uvolnění nástrojů.

3.5 Obráběcí stroj

Ke zkoušce byla použita vertikální konzolová frézka FV 25 CNC vyrobená firmou TOS Olomouc s.r.o. , s řídicím systémem Heidenhain 530i.



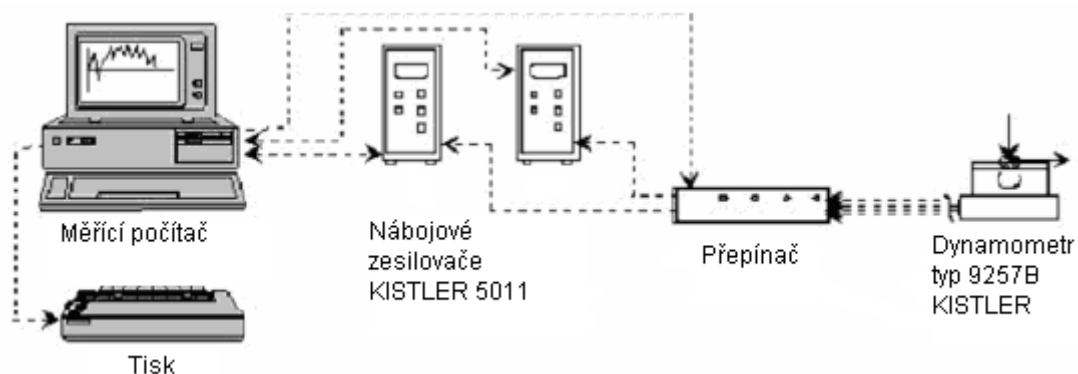
Obr. 3.3 Vertikální konzolová frézka FV 25 CNC

Základní parametry frézky:

- maximální otáčky 6000 ot/min,
- Upínací plocha stolu: 1300x350 mm,
- Pohyby v ose: X = 760 mm, Y = 355 mm, Z = 152 mm (svislý výsuv pinoly NC).

3.6 Měřicí zařízení

Axiální, radiální a tangenciální síly byly měřeny pomocí měřícího zařízení KISTLER. Tuto aparaturu je možné rozdělit na hardware (kde dochází k převodu na elektrické napětí, zesílení a distribuci) a software (kde se zpracovává signál). Na (Obr. 3.4) je uvedeno schéma zapojení. ²⁵

Obr. 3.4 Schéma piezoelektrické měřicí soupravy²⁸

3.7 Řezné podmínky

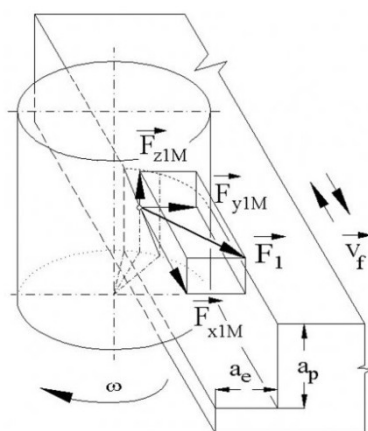
Řezné podmínky byly voleny dle doporučení výrobce. Po celou dobu experimentu a pro všechny nástroje zůstávaly nezměněny. Nastavené mezní podmínky jsou uvedeny v (tab. 3.4). Je nutné podotknout, že obrábění probíhalo za sucha (bez chladicí kapaliny). Frézování probíhalo sousledně i nesousledně. Všechna měření byla měřena záznamovým zařízením firmy KISTLER.

Tab. 3.4 Řezné podmínky

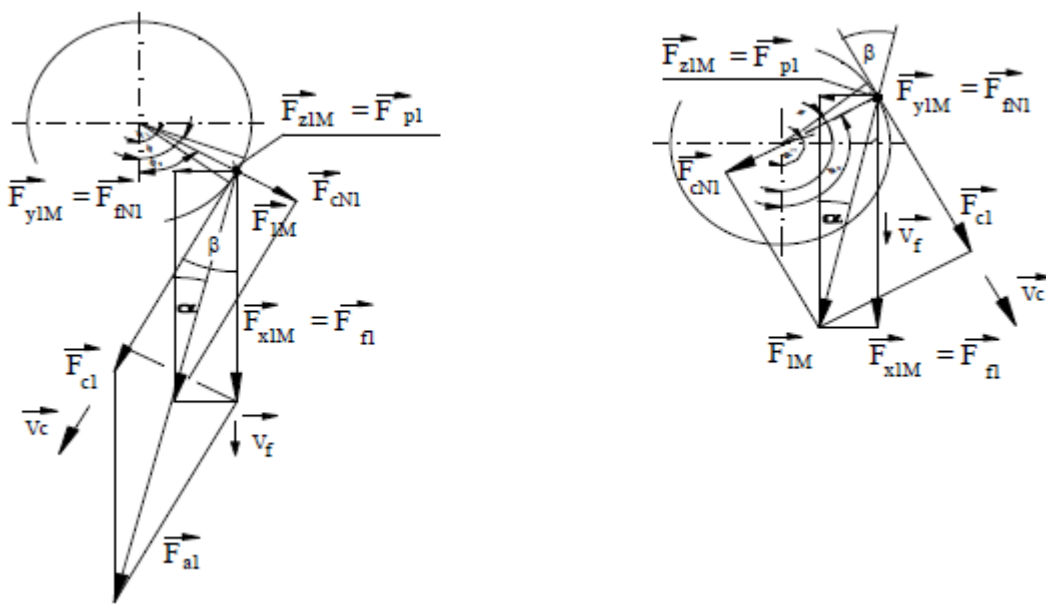
Veličina	řezné podmínky	jednotka
Řezná rychlost v_c	41	[m/min]
Otáčky n	1305	[ot/min]
Posuv na zub f	0,031	[mm]
Posuvová rychlost v_f	161	[mm/min]
Šířka řezu a_e	1	[mm]
Hloubka řezu a_p	10	[mm]
Chlazení (chladicí kapalina)	bez chlazení	
Kritérium opotřebení	jiskření, přílišné vibrace, zbarvení třísky	

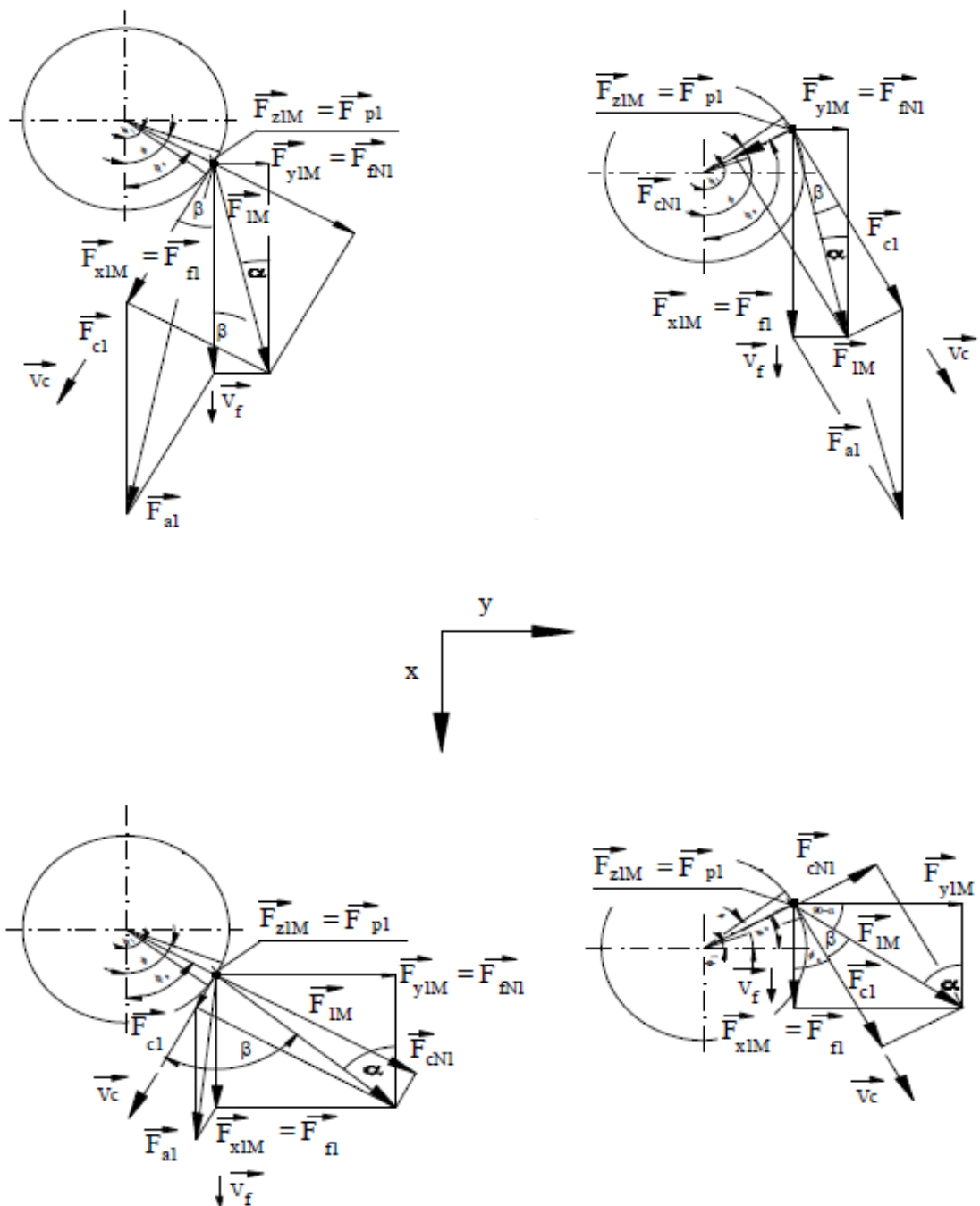
3.8 Analýza měřených hodnot

V průběhu měření bylo zjištěno, že osové zatížení fréz nebylo možné pro jejich nevýznamnost zanedbat, nýbrž bylo nutné přikládat jim stejnou váhu jako zbývajícím dvěma silovým složkám. To dokazují následující grafy, kde je silový průběh (F_p) vyobrazen. Je nutné podotknout, že vždy byl v záběru pouze jeden břit testované frézy. V následujících obrázcích jsou měřené síly indexovány takto ($F_x = F_{x1M}$), ($F_y = F_{y1M}$), ($F_p = F_{z1M}$).



Obr. 3.5 Fyzikální model zatížení řezného nástroje (obrobku) v průběhu obrábění ²⁶.





Obr. 3.6 Silový rozklad v průběhu opotřebení pro nesousledné (vlevo) a sousledné (vpravo) frézování²⁷

Při měření byla v závislosti na požadovaný výsledek nastavena snímkovací frekvence měřícího přístroje na 100 Hz a čas průjezdu s ohledem na posuvovou rychlost a délku obrobku 100 sekund. Vzhledem velké snímkovací frekvenci a z toho vyplývajícím velkému množství zdrojových

hodnot, bylo nutné je dále filtrovat. Základním kritériem při filtraci byla maximální hodnota výslednice naměřených sil s ohledem na jeden břit v záběru a největší průřez třísky v daném časovém intervalu. Časové intervaly byly voleny v závislosti na otáčkách a snímkovací frekvenci při měření. Filtrace probíhala za pomoci speciálně vytvořeného programu pouze pro tento účel. Z dvakrát přefiltrovaných zdrojových hodnot byly vypočteny následující silové účinky (F , F_c , F_{cN} , F_D), které byly vyneseny do grafů.



Obr. 3.7 Průběh experimentu

3.9 Analýza opotřebení

Opotřebené nástroje byly nauhličený a nafotografovány pomocí elektronového mikroskopu ve dvou módech. Mód sekundárních a zpětně odražených elektronů.

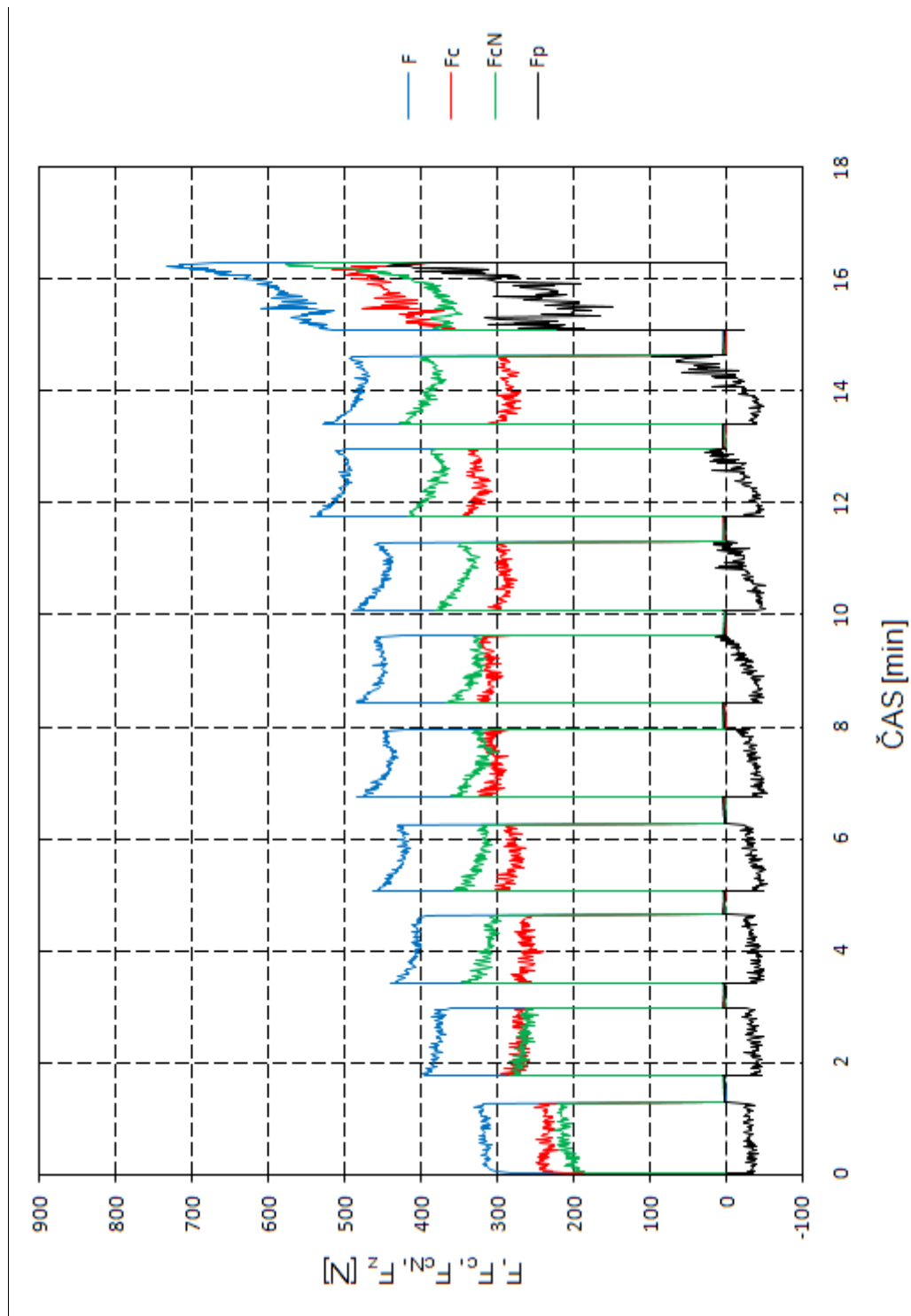
3.9.1 Princip elektronového mikroskopu

Elektronový mikroskop pracuje na principu interakce úzkého svazku elektronů s povrchem vzorku. Elektrony jsou emitovány žhavenou katodou, urychlovány v tzv. elektronové trysce a dále pomocí elektromagnetických čoček usměrňovány po povrchu pozorovaného předmětu a současně na stínítku přístroje. Po dopadu na předmět dochází k jejich částečnému odrazu –

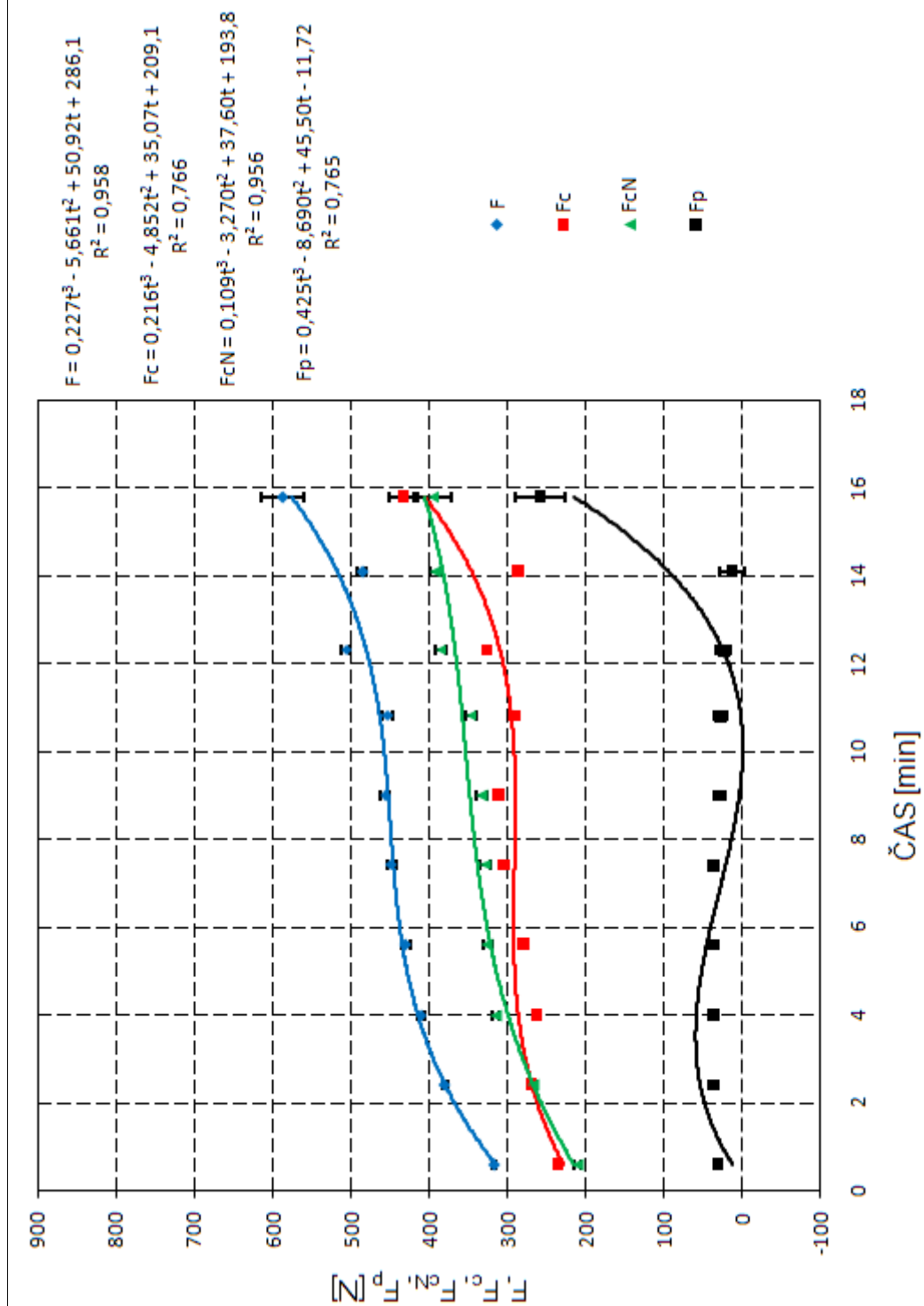
rozptylu a dále k uvolnění fotonů a sekundárních elektronů, které po zesílení modulují jas původního elektronového svazku na monitoru a vytvářejí tak obraz povrchu.²⁷

4 VERIFIKACE POZNATKŮ

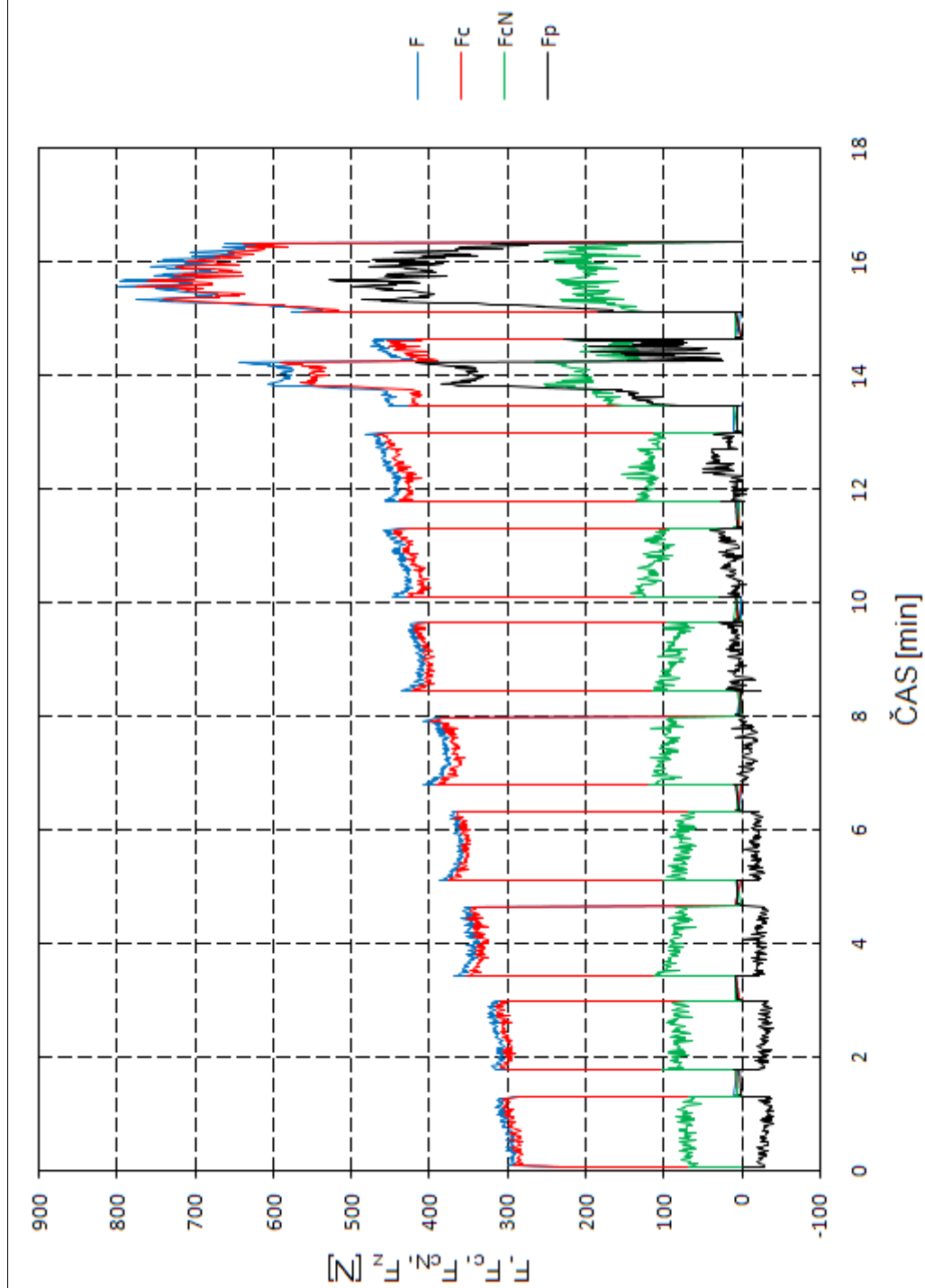
4.1 Grafy silových průběhů HSSE – PM +AITiN



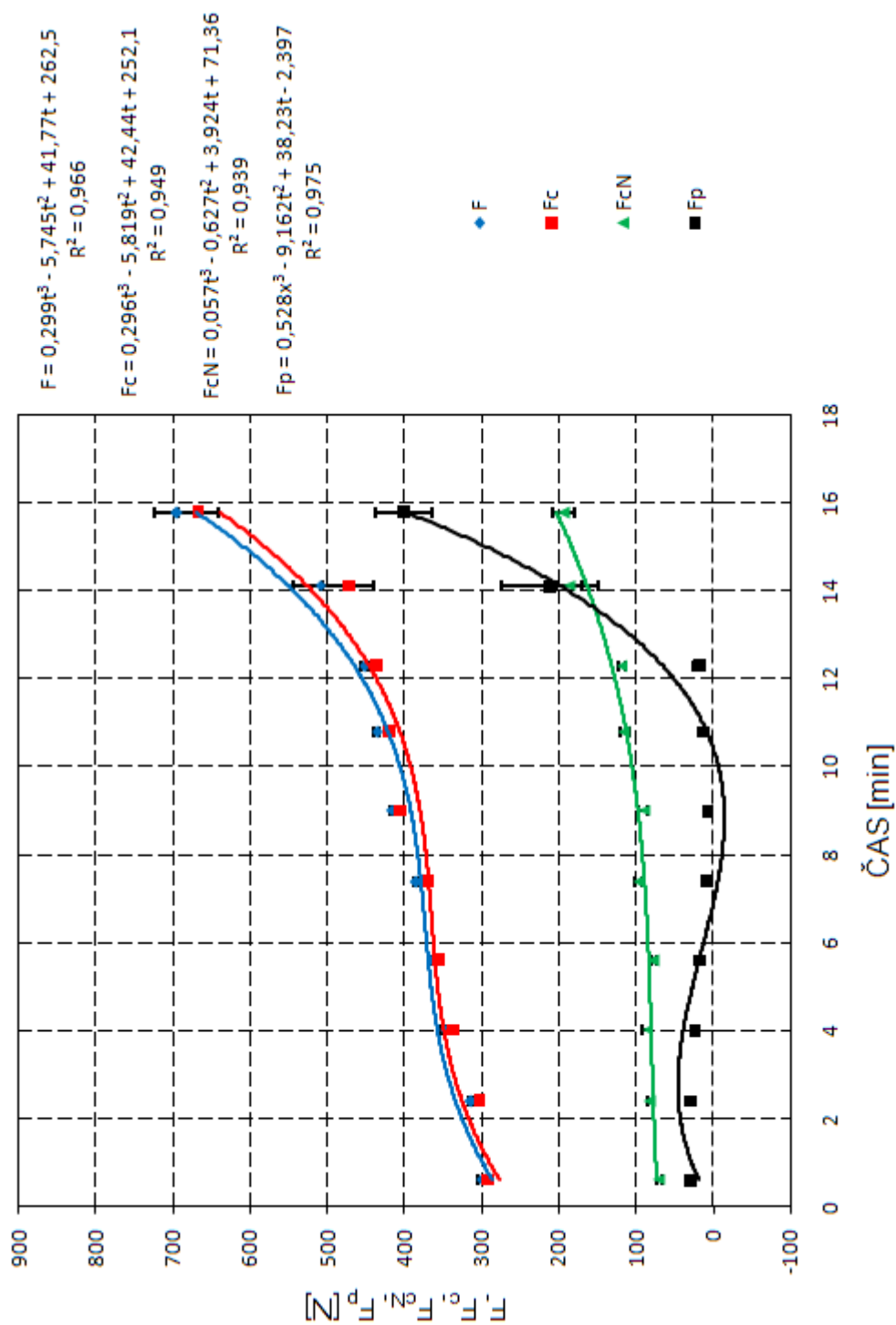
Obr. 4.1 Silový průběh při frézování nástrojem HSSE - PM + AITiN (nesousledné)



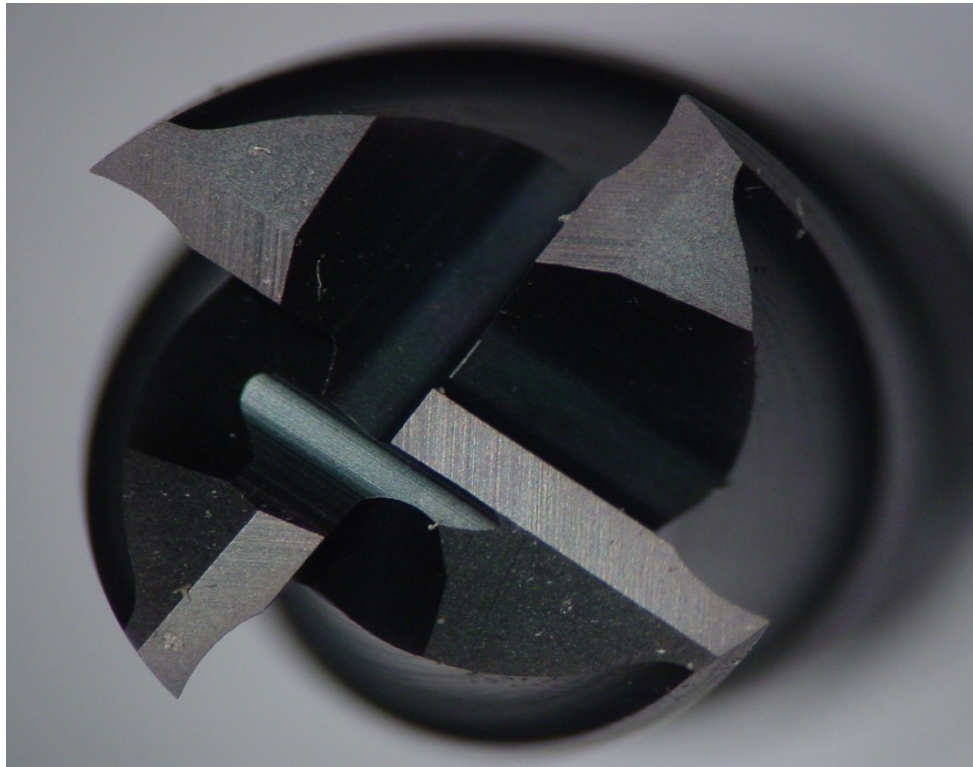
Obr. 4.2 Graf průměrných hodnot sil + rovnice regrese (nesousledné)



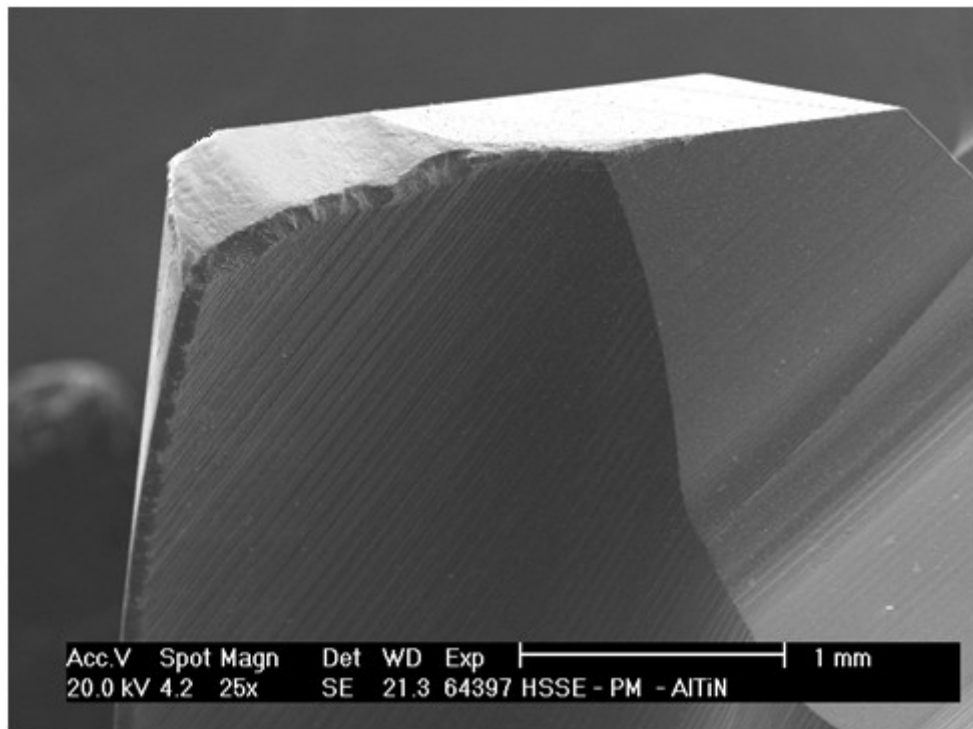
Obr. 4.3 Silový průběh při frézování nástrojem HSSE - PM + AlTiN (sousledné)



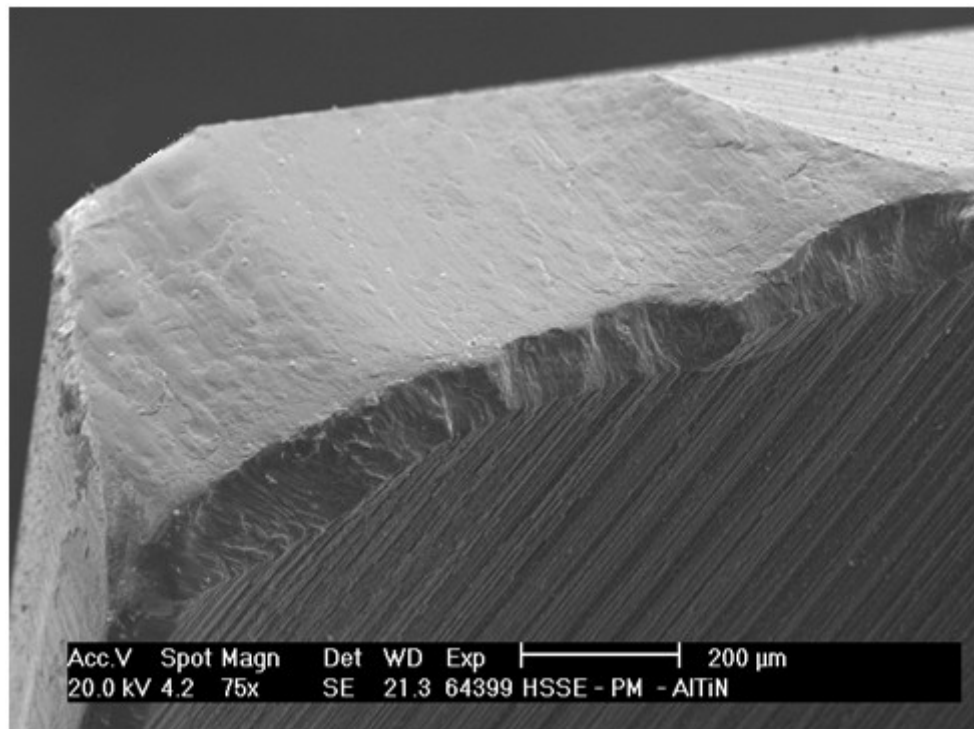
Obr. 4.4 Graf průměrných hodnot sil + rovnice regrese (sousedně)



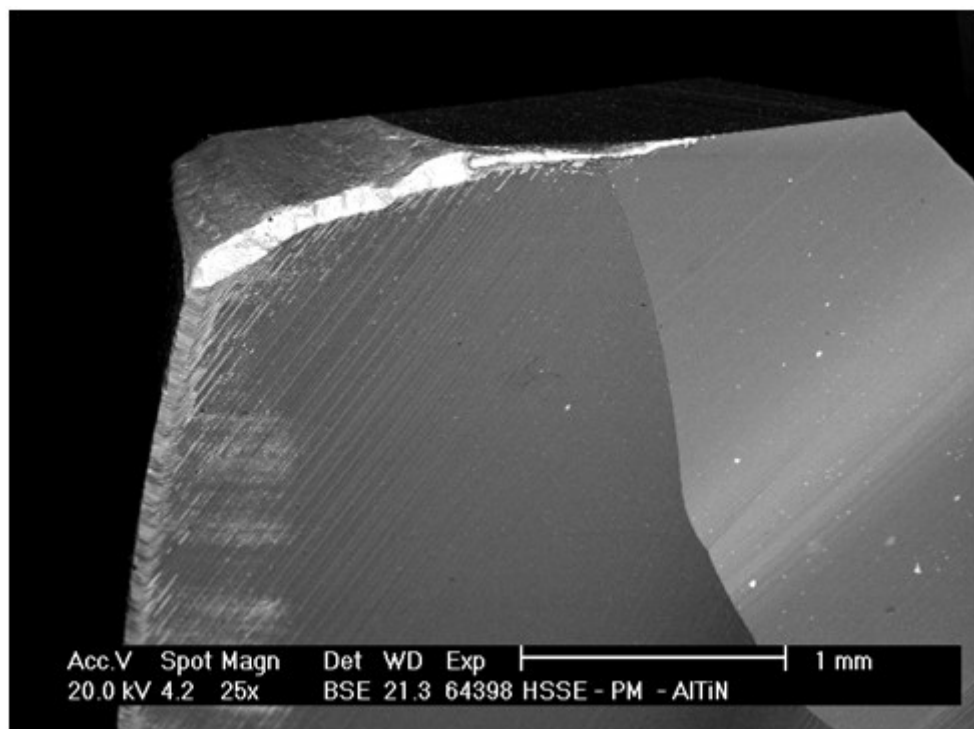
Obr. 4.5 Čtyřbřitá fréza HSSE-PM + AlTiN před experimentem



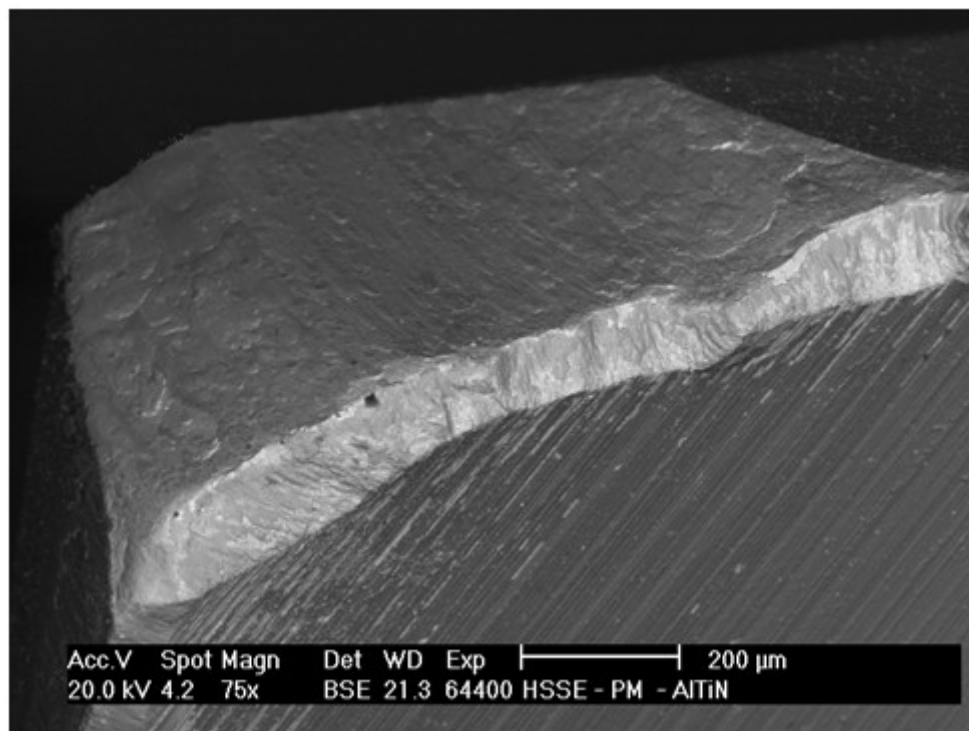
Obr. 4.6 Opotřeбенý hřbet, břit a fazeta nástroje HSSE-PM + AlTiN
(sekundární elektrony) REM 25x



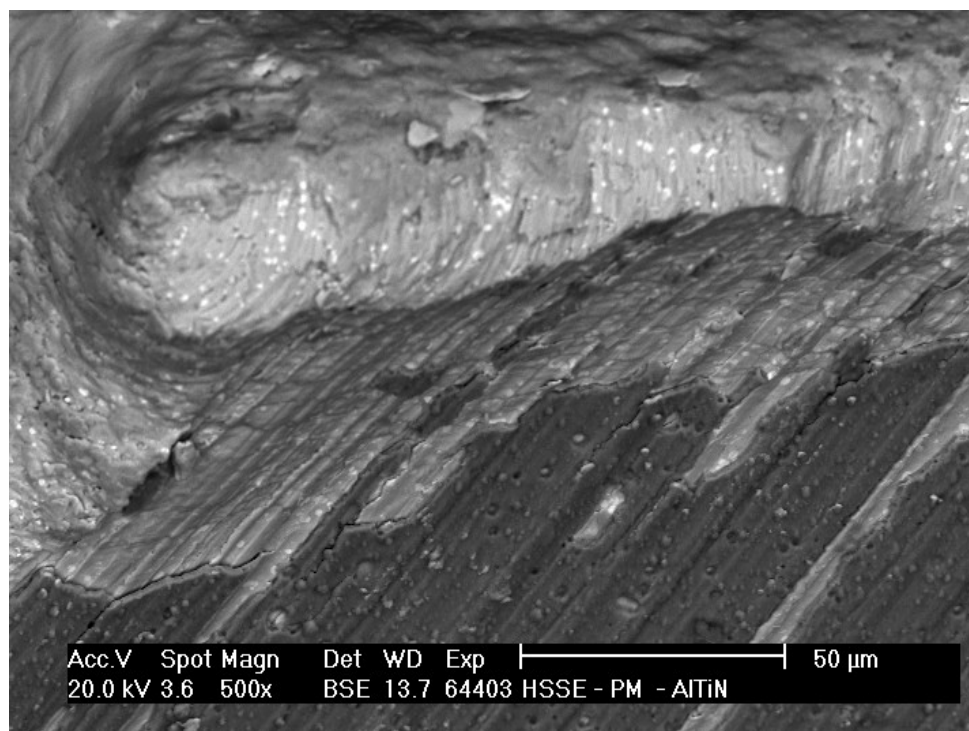
Obr. 4.7 Opatřebený hřbet a břít nástroje HSSE-PM + AlTiN
(sekundární elektrony) REM 75x



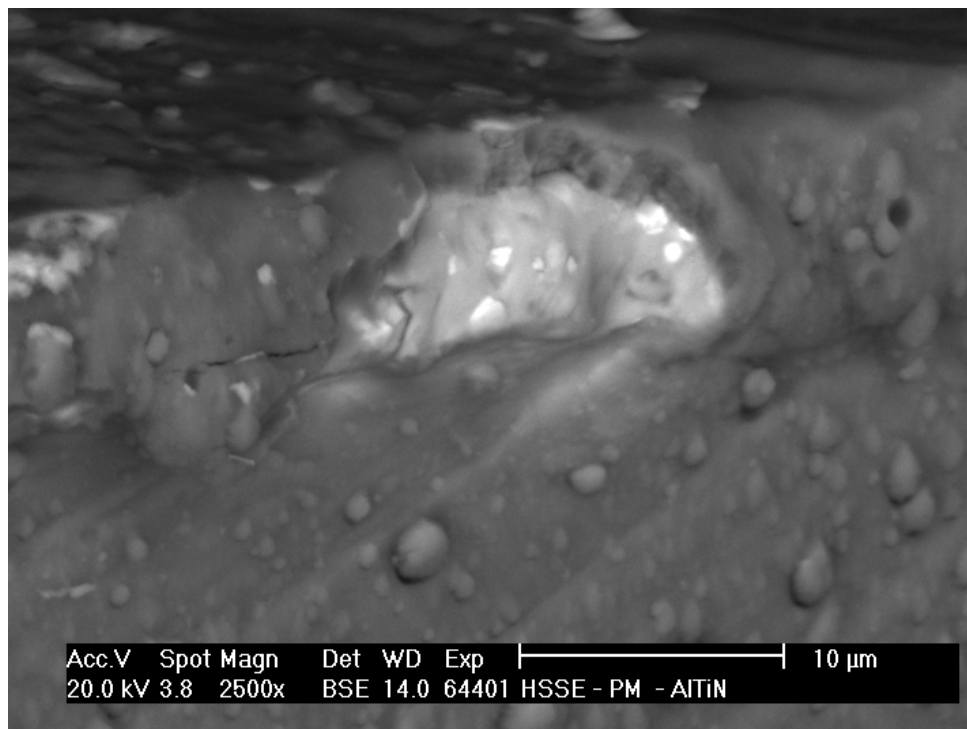
Obr. 4.8 Opatřebený hřbet, čelo, břít a fazeta nástroje HSSE-PM + AlTiN
(zpětně odražené elektrony) REM 25x



Obr. 4.9 Opotřeбенý hřbet, čelo a břít nástroje HSSE-PM + AlTiN (zpětně odražené elektrony) REM 75x



Obr. 4.10 Detail špičky a břitu nástroje (zpětně odražené elektrony) REM 500x



Obr. 4.11 Detail odlomeného povlaku (zpětně odražené elektrony) REM 2500x

Na (obr. 4.5) je vyobrazena fréza vyrobená práškovou metalurgií s povlakem AlTiN před frézováním. Jsou zde vyobrazené ostře vybroušené břity a na první pohled patrná neporušenost povlaku. Zvětšení je však příliš nízké pro další analýzy stavu porušení ostří, resp. povlaku.

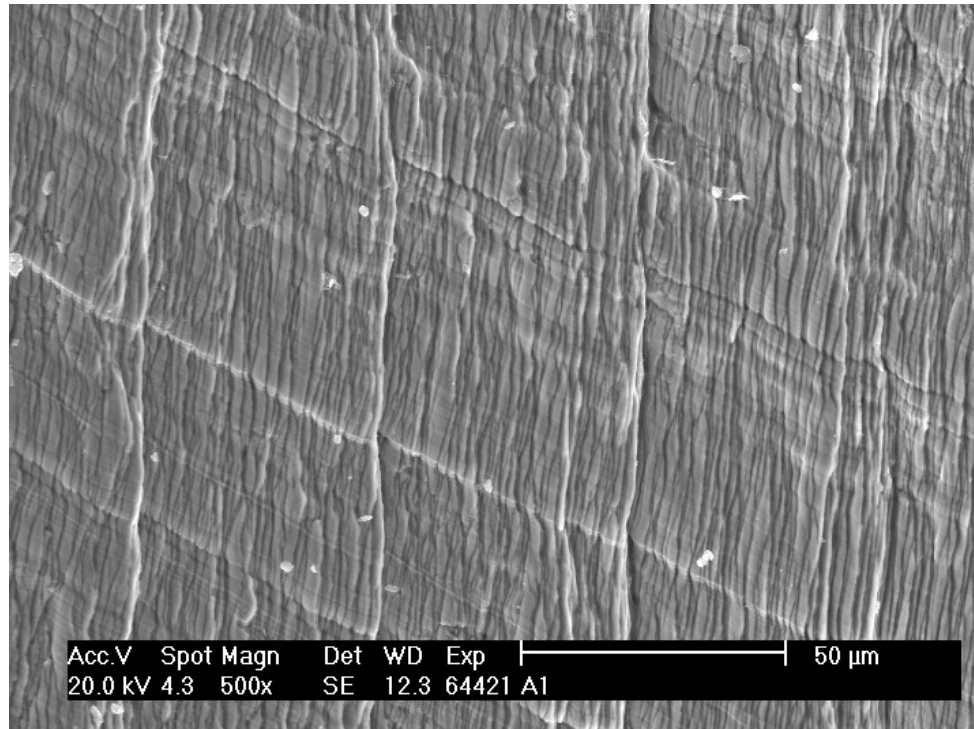
(obr. 4.6, 4.7) Z tohoto je patrné výrazné opotřebení hřbetu nástroje, kde došlo k odstranění části materiálu a břítu nástroje, kde byly vylomeny části ostří.

(obr. 4.8, 4.9) Z těchto obrázků je patrné opotřebení až na základní substrát nástroje a to nejen na hřbetě ale i na čele nástroje. Dále je zde na (obr. 4.8) vyobrazeno abrazivní opotřebení čela nástroje v důsledku odcházející třísky.

Na (obr. 4.10) je vyobrazena otupená špička a část břítu nástroje. Je zde patrné oprýskání povlaku v důsledku teplotního a abrazivního zatížení a adheze obráběného materiálu k povrchu nástroje.

Na (obr. 4.11) je zachyceno místo, kde vlivem opotřebení došlo k odlomení části povlaku. Z prokreslení jednotlivých vrstev vyobrazených na

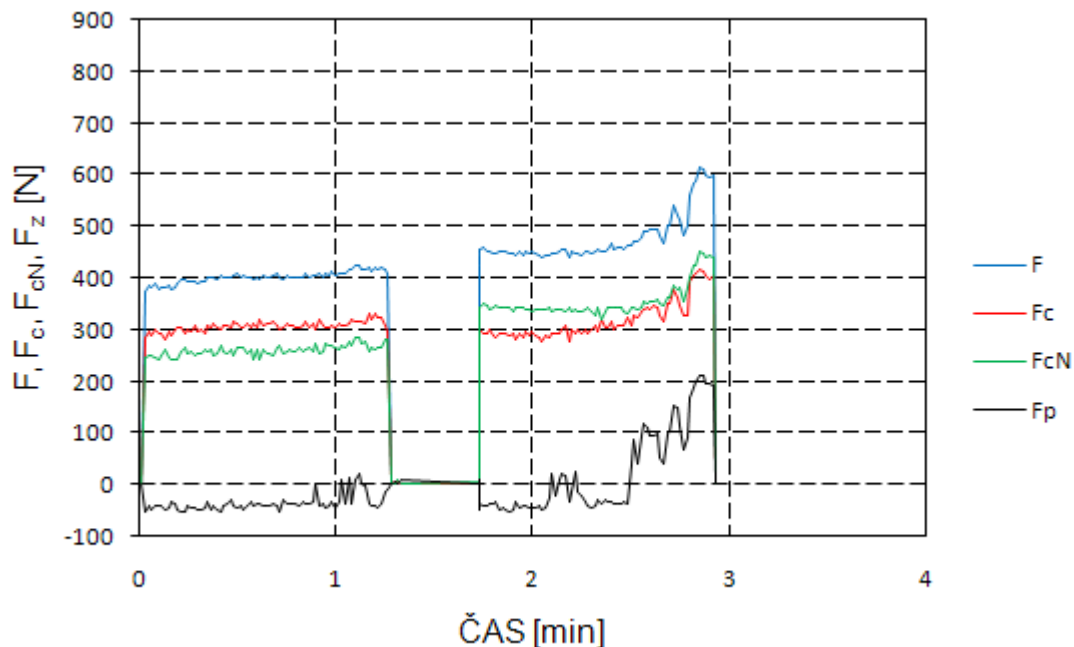
obrázku je zřejmé, že se jedná o multivrstvý povlak. Je zde také vidět nedokonalost deponované vrstvy.



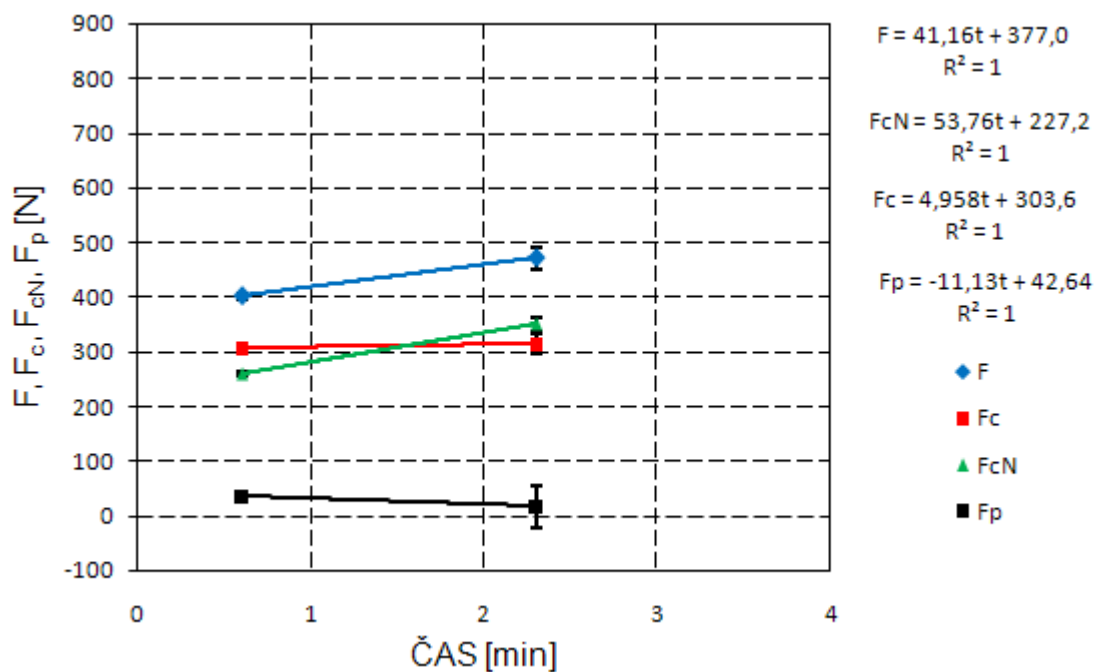
Obr. 4.12 Detail třísky po prvním řezu nástrojem HSSE-PM + AlTiN
(sekundární elektrony) REM 500x

Z (obr. 4.12) je patrná pravidelnost utváření třísky. Jednotlivé oblasti jsou téměř shodně napěchovány. Z tohoto lze soudit, že tato tříska vznikla ostrým nástrojem.

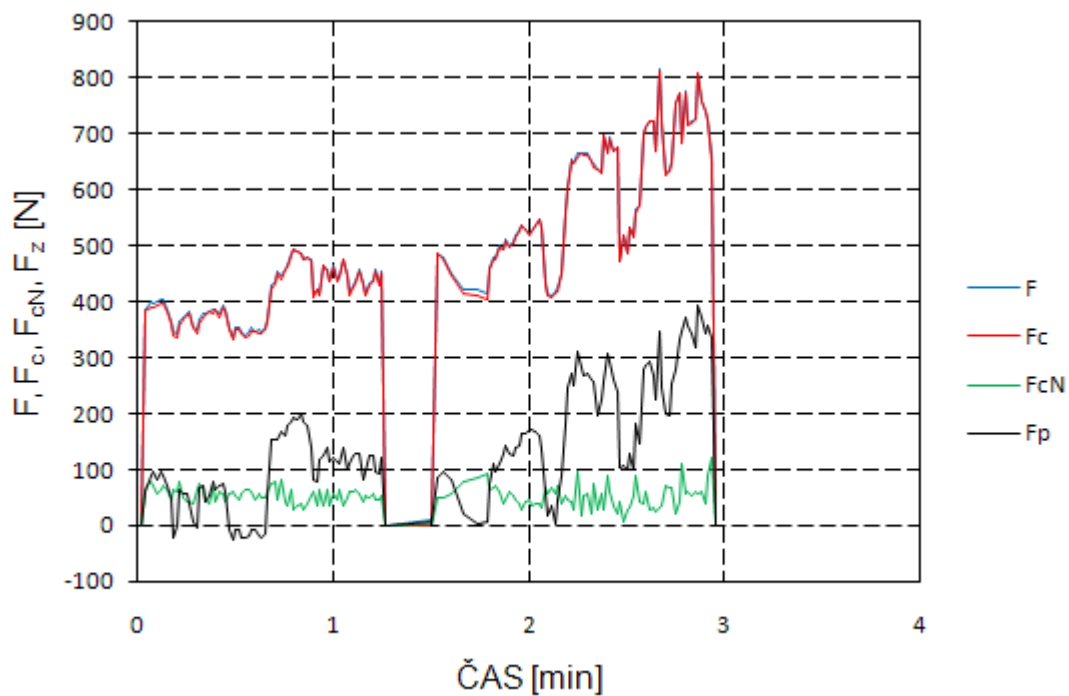
4.2 Grafy silových průběhů HSSE – PM



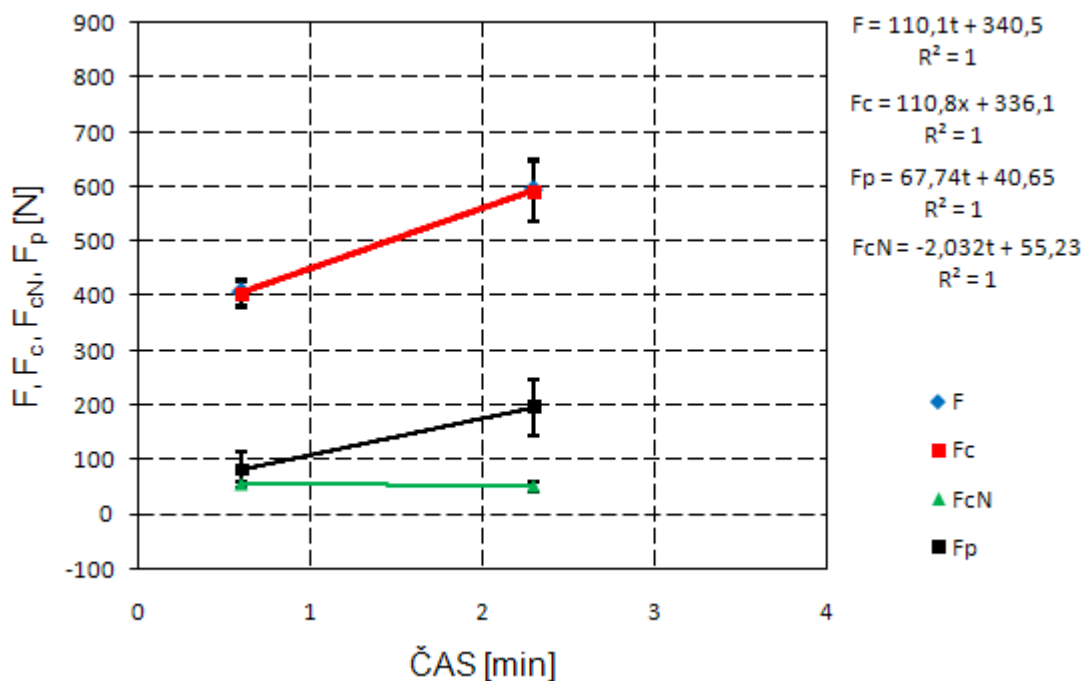
Obr. 4.13 Silový průběh při frézování nástrojem HSSE-PM (nesousledné)



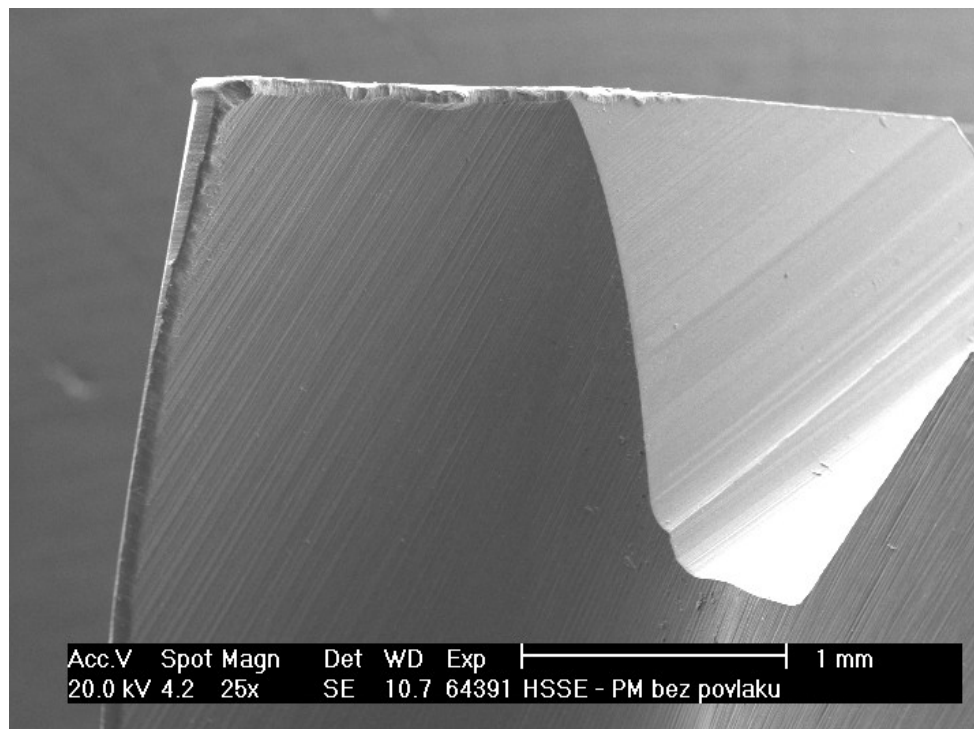
Obr. 4.14 Graf průměrných hodnot sil + rovnice regrese (nesousledné)



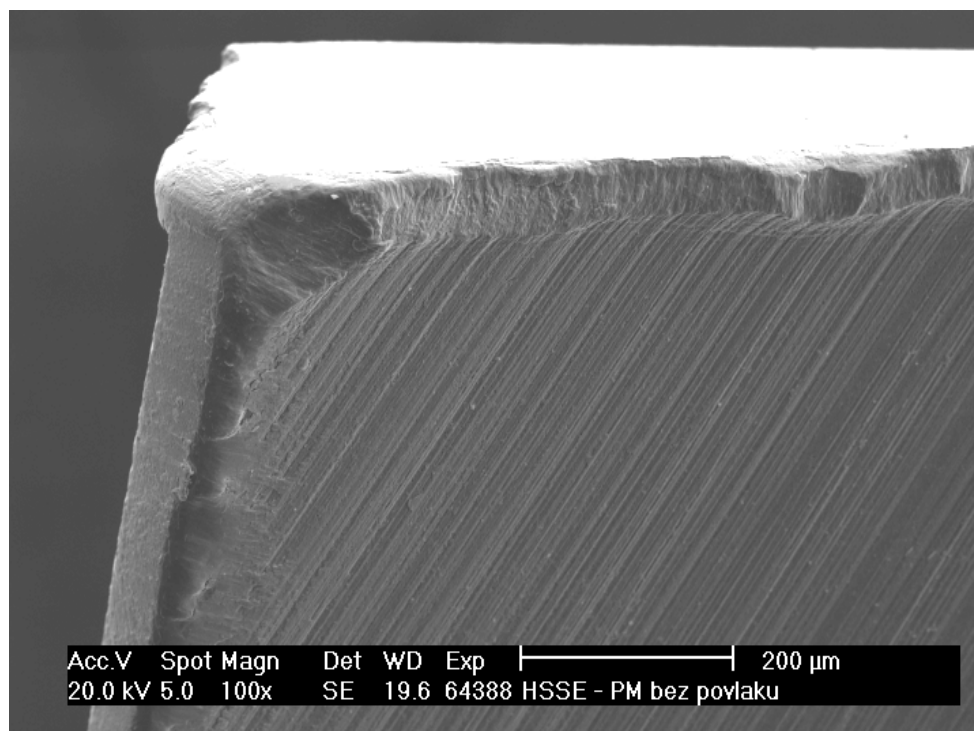
Obr. 4.15 Silový průběh při frézování nástrojem HSSE- PM (sousedné)



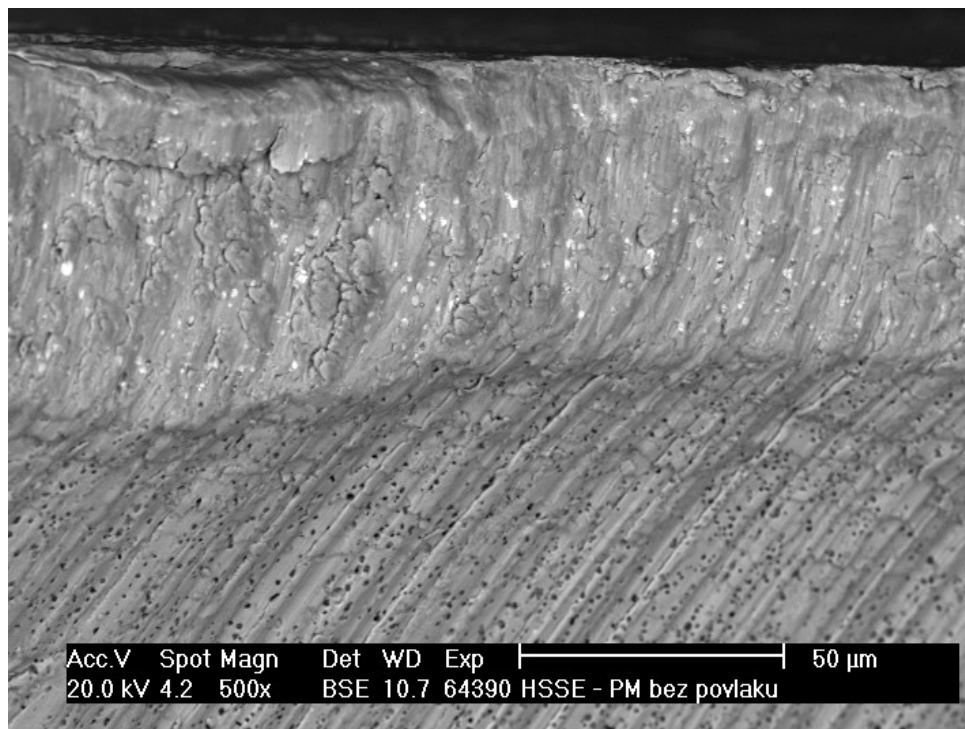
Obr. 4.16 Graf průměrných hodnot sil + rovnice regrese (sousedné)



Obr. 4.17 Opotřebený břit a fazeta nástroje HSSE-PM (zpětné elektrony) REM
25x



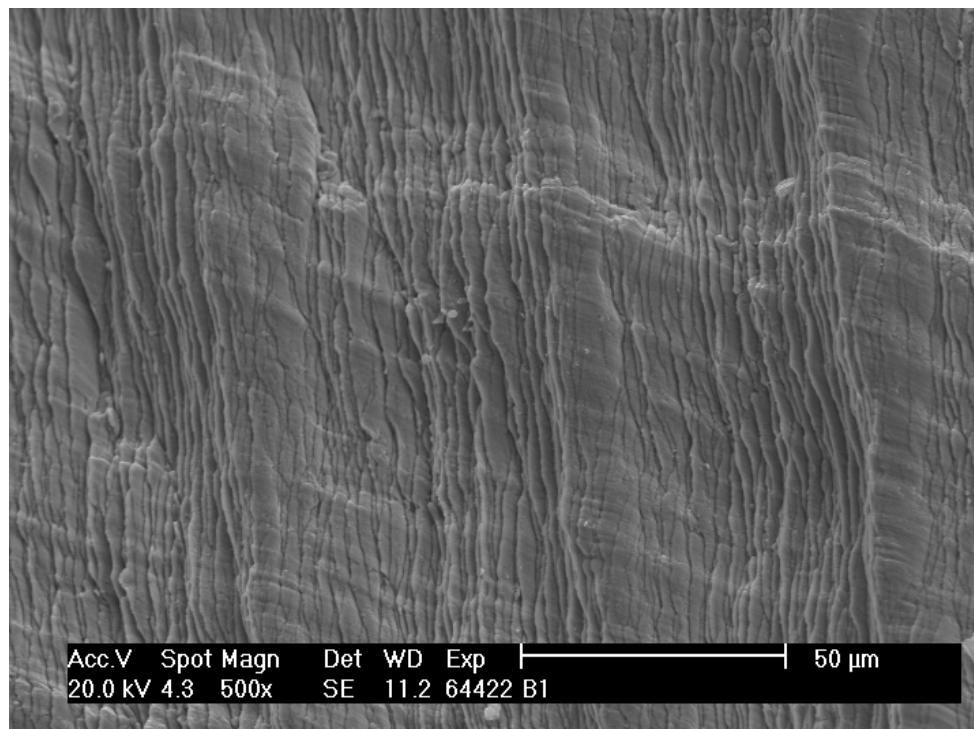
Obr. 4.18 Opotřebený břit a fazeta nástroje HSSE-PM (zpětné elektrony) REM
100x



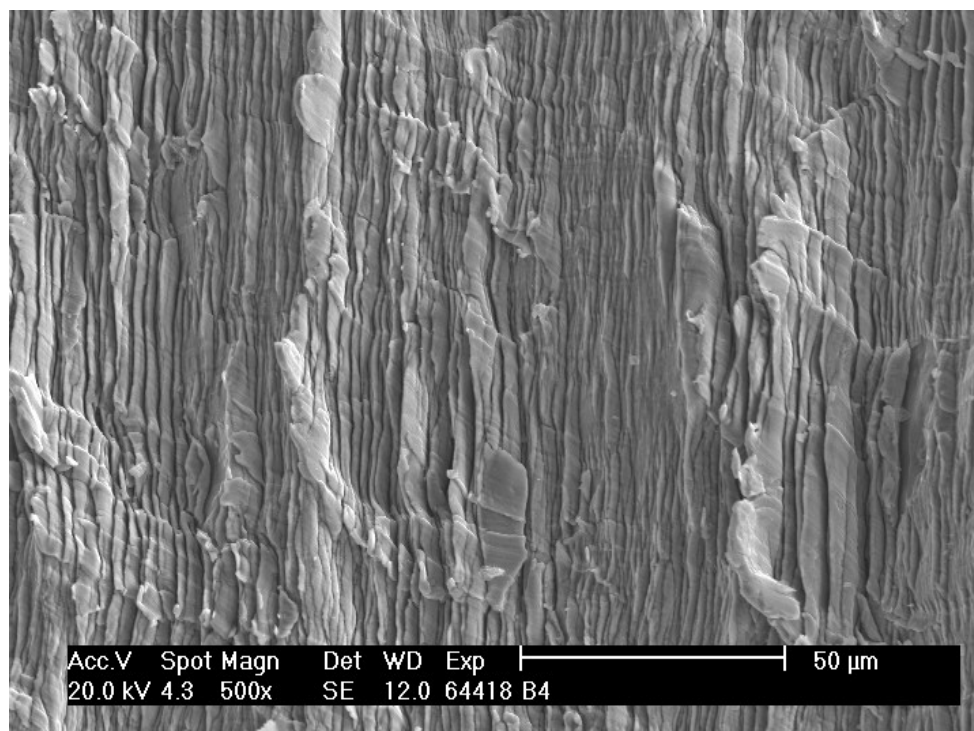
Obr. 4.19 Detail břitu nástroje HSSE-PM (zpětně odražené elektrony)
REM 500x

Na (obr. 4.17, 4.18) je vyobrazeno progresivní opotřebení břitu nástroje.

Z (obr. 4.19) je patrné, že v průběhu obrábění docházelo k nalepování materiálu obrobku na nástroj. Póry, které jsou z tohoto obrázku znatelné, jsou způsobeny odstraňováním povlaku. Tento nástroj ZPS-FN a.s., Zlín nabízí ve svém katalogu s povlakem i bez, avšak dostupnost jeho nepovlakované verze je pouze v tomto provedení. Tyto póry jsou následkem vyleptání některé ze složek substrátu. Tento jev výrazným způsobem negativně ovlivnil životnost nástroje.



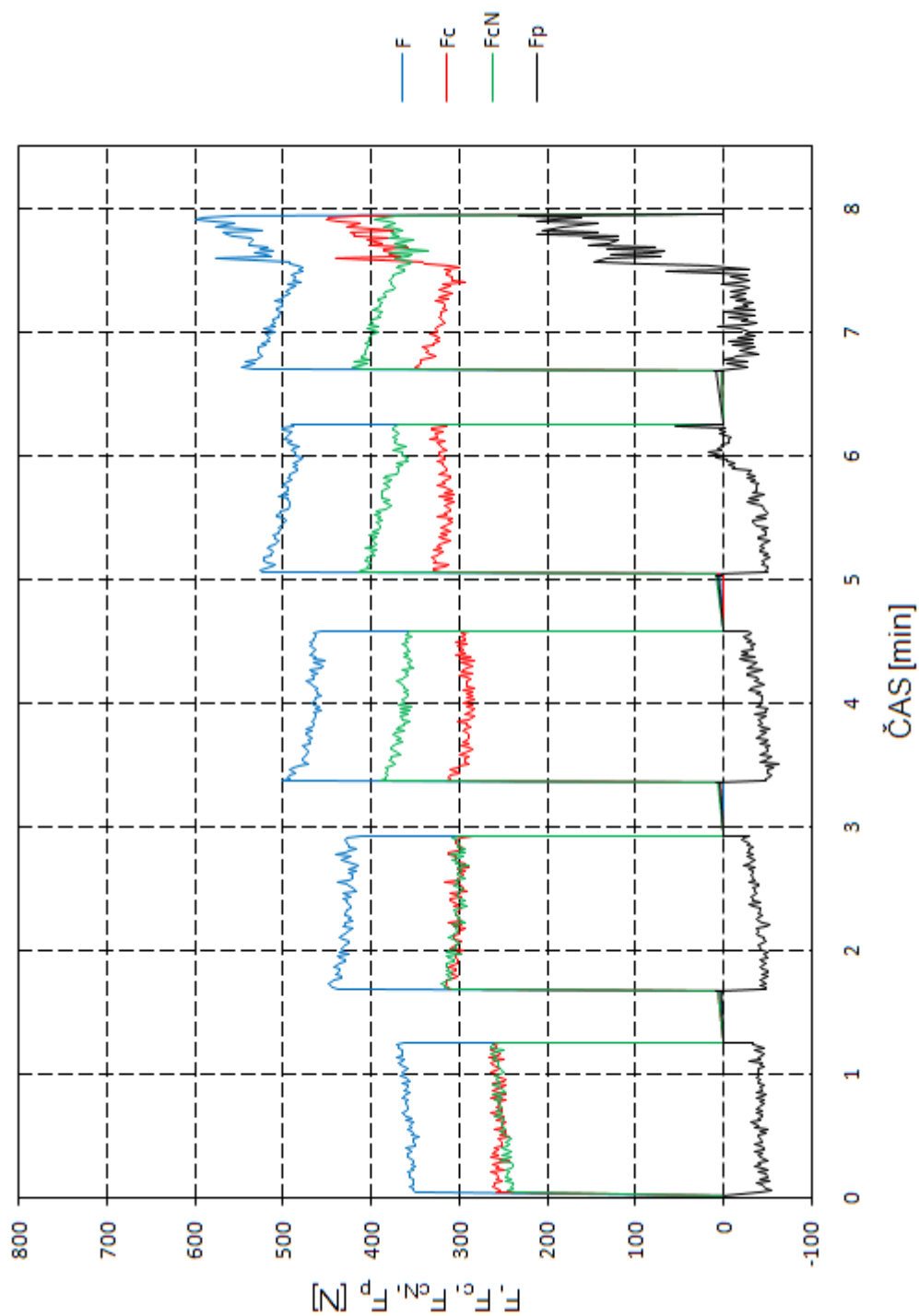
Obr. 4.20 Detail třísky po prvním řezu nástrojem HSSE-PM (sekundární elektrony) REM 500x



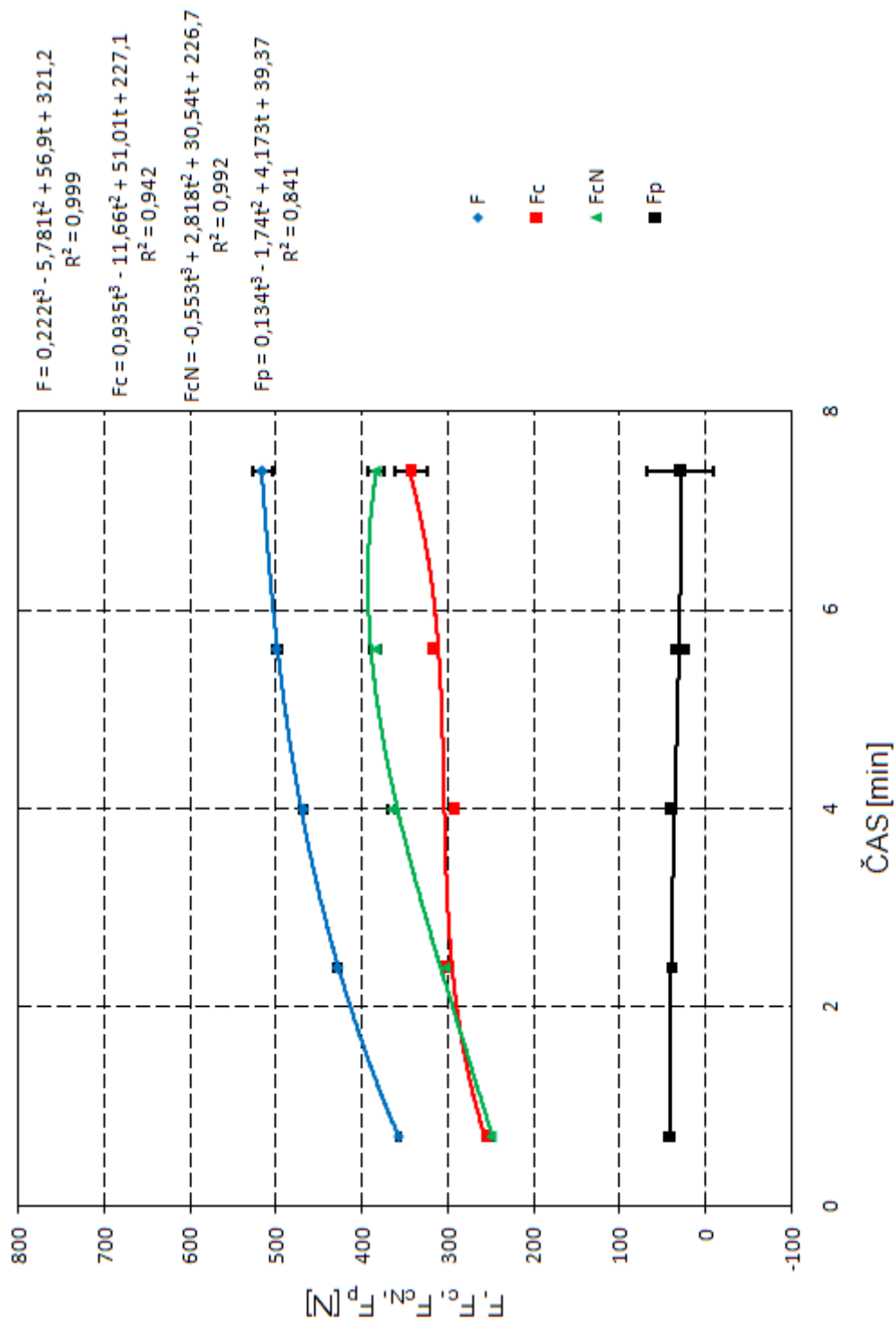
Obr. 4.21 Detail třísky po čtvrtém (závěrečném) řezu nástrojem HSSE-PM (sekundární elektrony) REM 500x

Na (obr. 4.21) lze pozorovat částice lokálně vytrženého materiálu obrobku. Důsledkem bylo zhoršení kvality obrobeného povrchu.

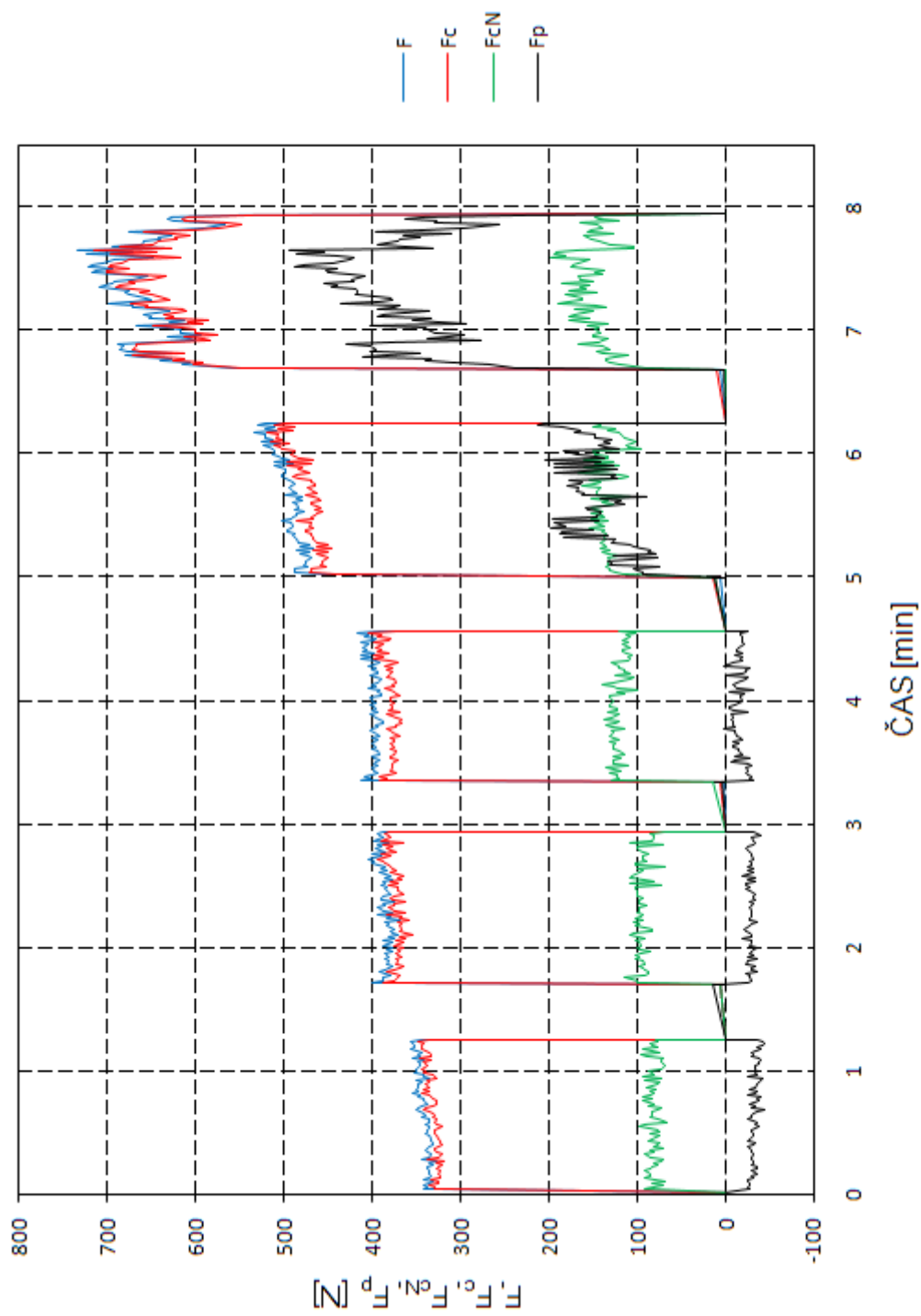
4.3 Grafy silových průběhů HSS Co8 + AlTiN



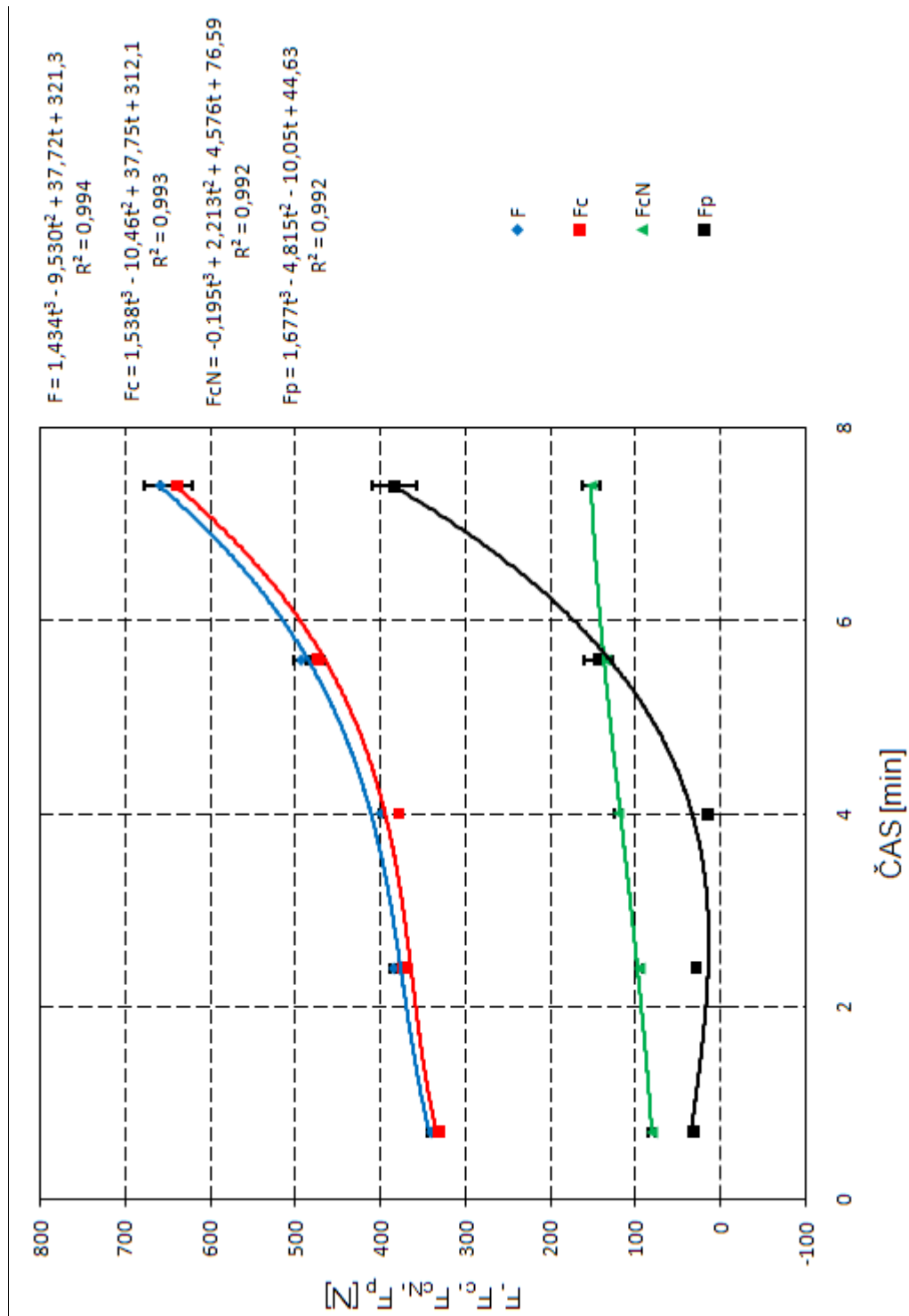
Obr. 4.22 Silový průběh při frézování nástrojem HSS Co8 + AlTiN (nesousledné)



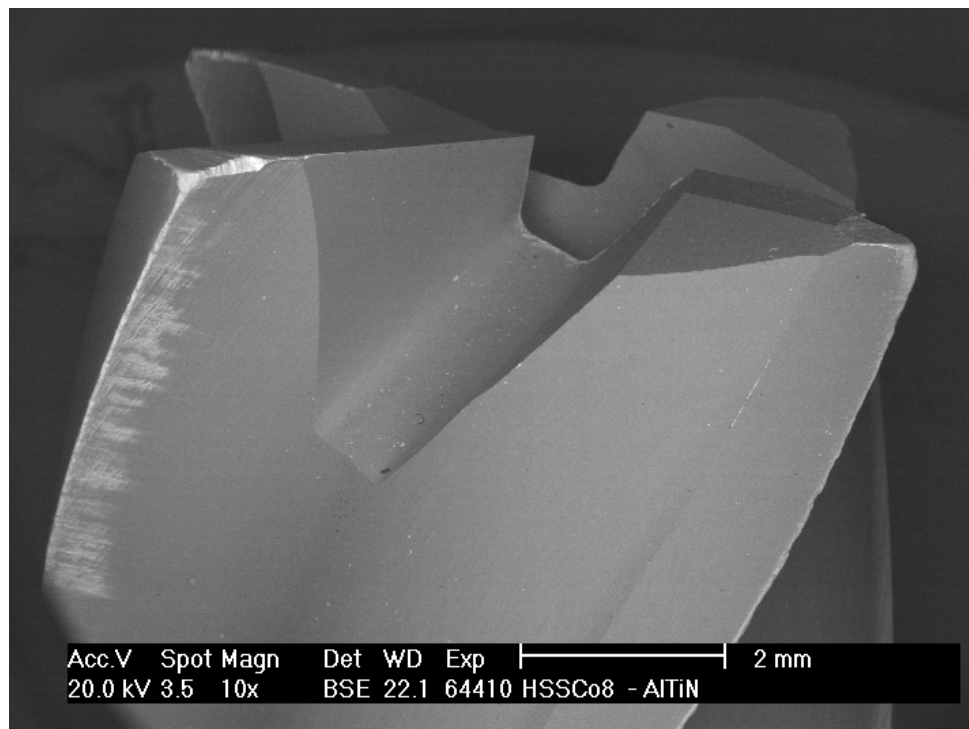
Obr. 4.23 Graf průměrných hodnot sil + rovnice regrese (nesousledné)



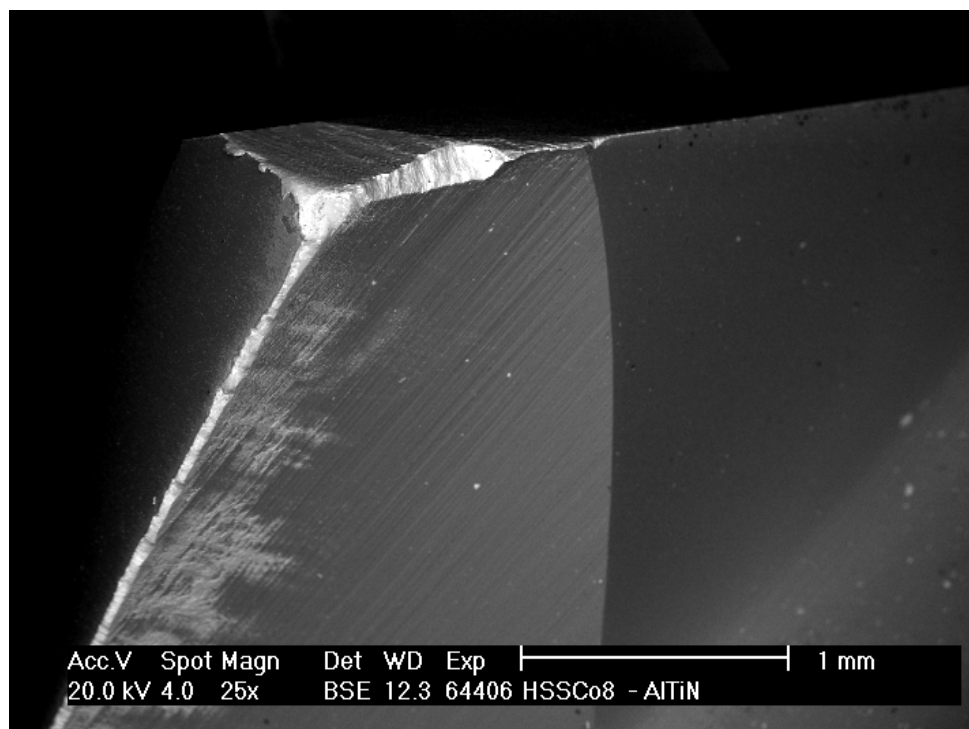
Obr. 4.24 Silový průběh při frézování nástrojem HSS Co8 + AlTiN (sousedné)



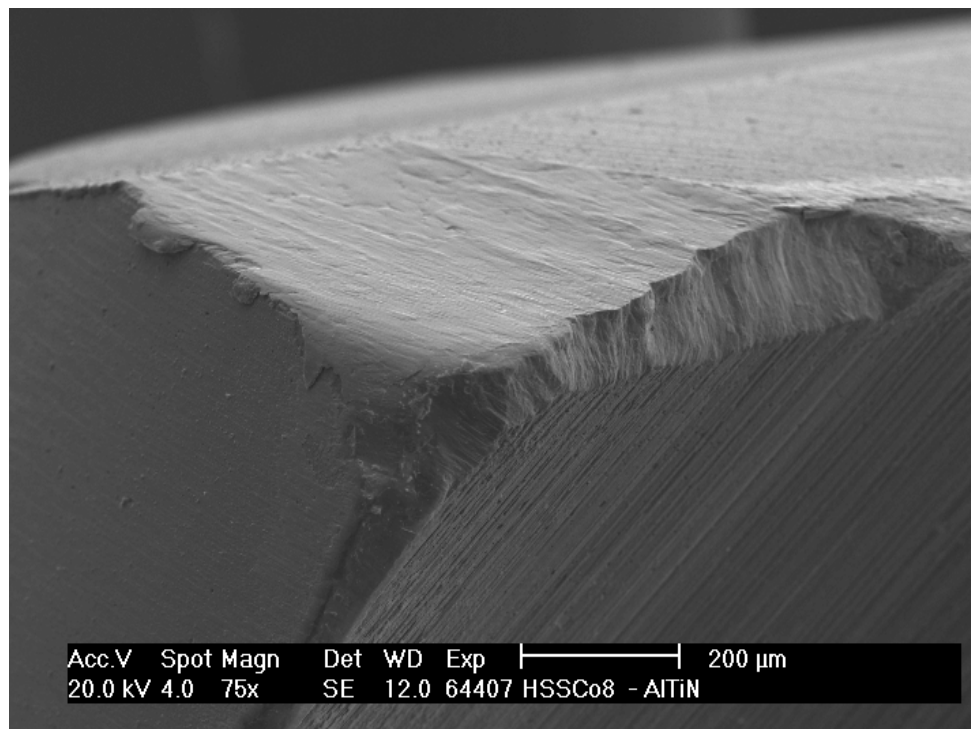
Obr. 4.25 Graf průměrných hodnot sil + rovnice regrese



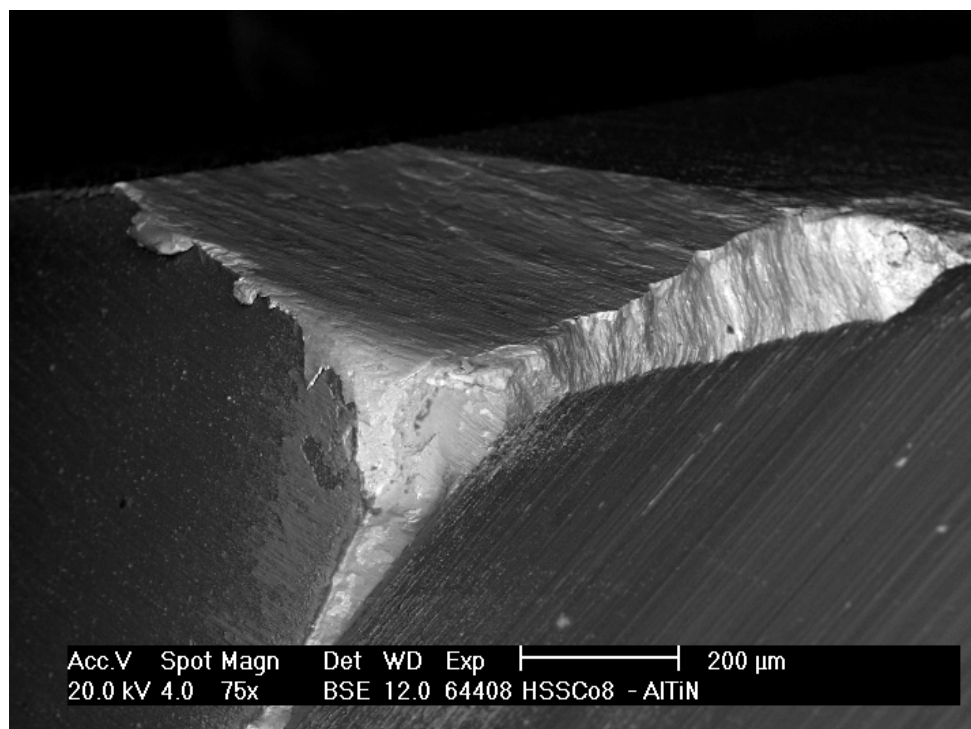
Obr. 4.26 Čtyřbřitá fréza HSS Co8 + AlTiN po experimentu (zpětně odražené elektrony) REM 10x



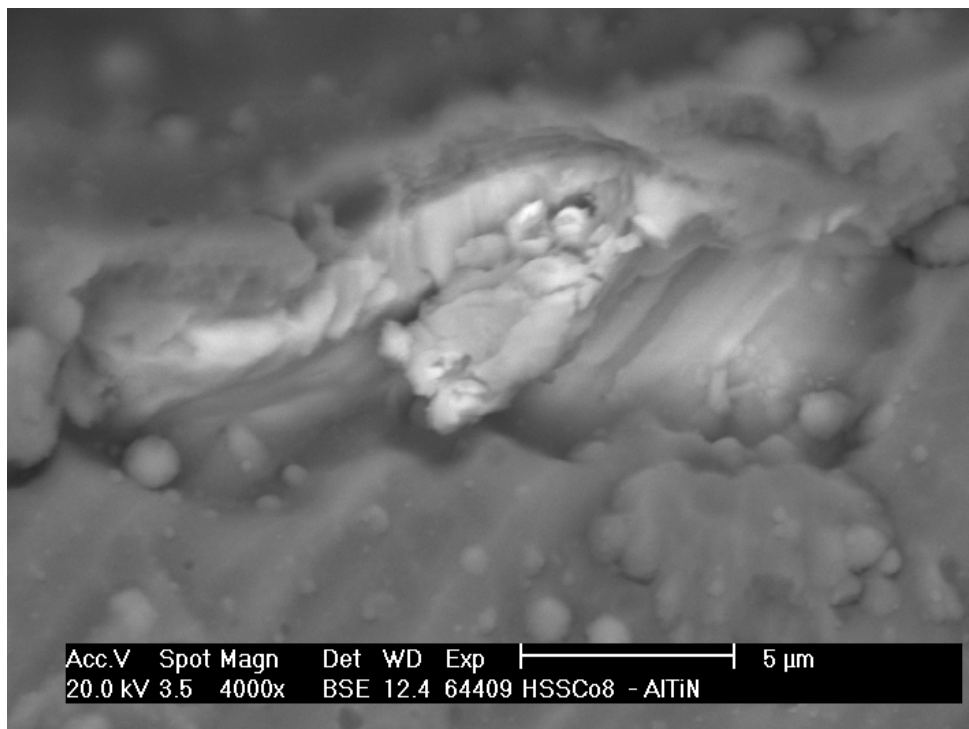
Obr. 4.27 Opatřebený hřbet, čelo, břit a fazeta nástroje HSS Co8 + AlTiN (zpětně odražené elektrony) REM 75x



Obr. 4.28 Opotřebený hřbet, břít a fazeta nástroje HSS Co8 + AlTiN
(sekundární elektrony) REM 75x



Obr. 4.29 Opotřebený hřbet, čelo, břít a fazeta nástroje HSS Co8 +
AlTiN (zpětně odražené elektrony) REM 75x



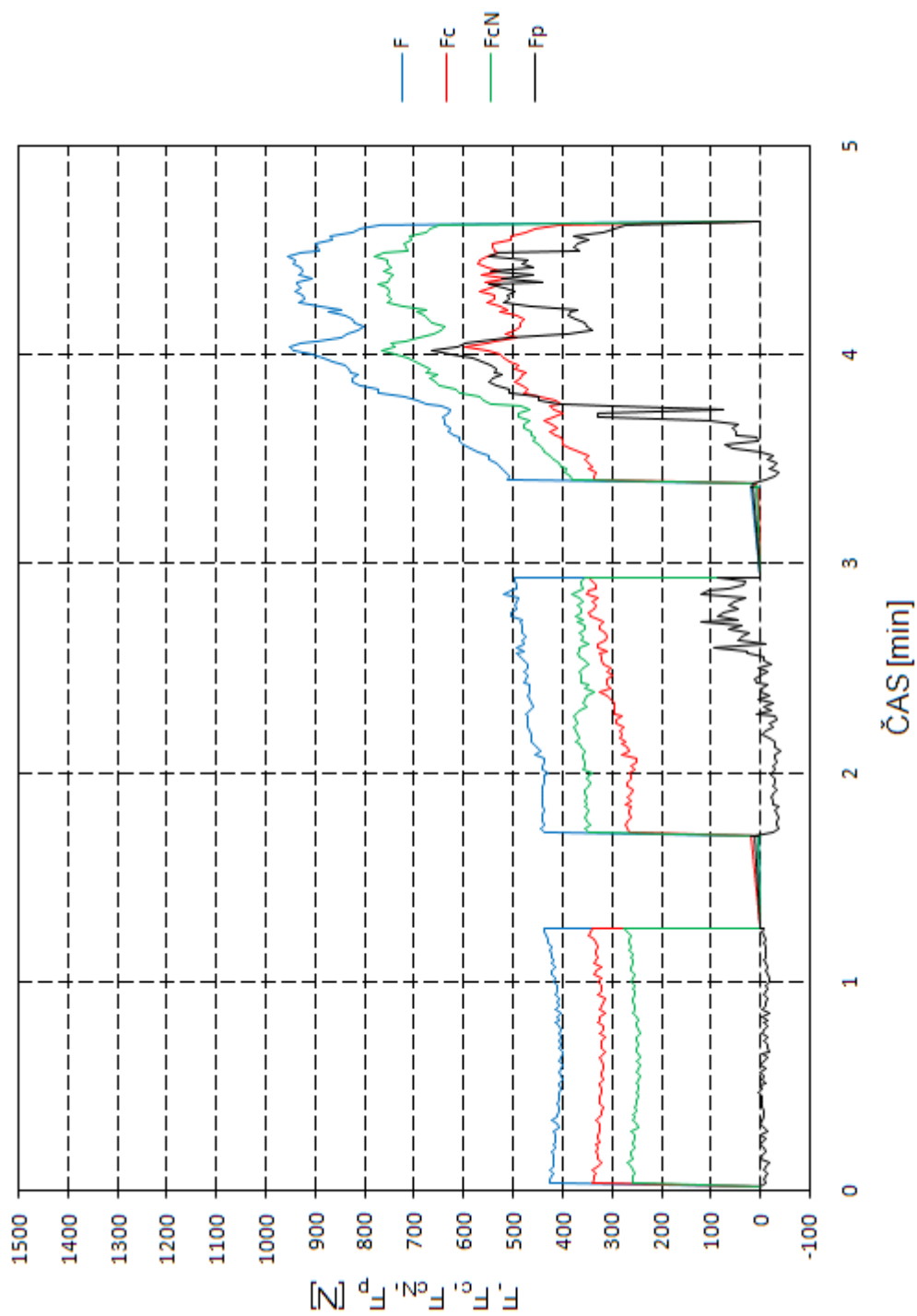
Obr. 4.30 Detail odloupnutého povlaku (zpětně odražené elektrony) REM
4000x

Z (obr. 4.27) je zřejmé poškození hřbetu odebráním části materiálu základního substrátu nástroje. Dále je zde patrné vylámání hlavního ostří, poškození fazety a abrazivní opotřebení na čele nástroje. To vše následkem zvolených řezných podmínek.

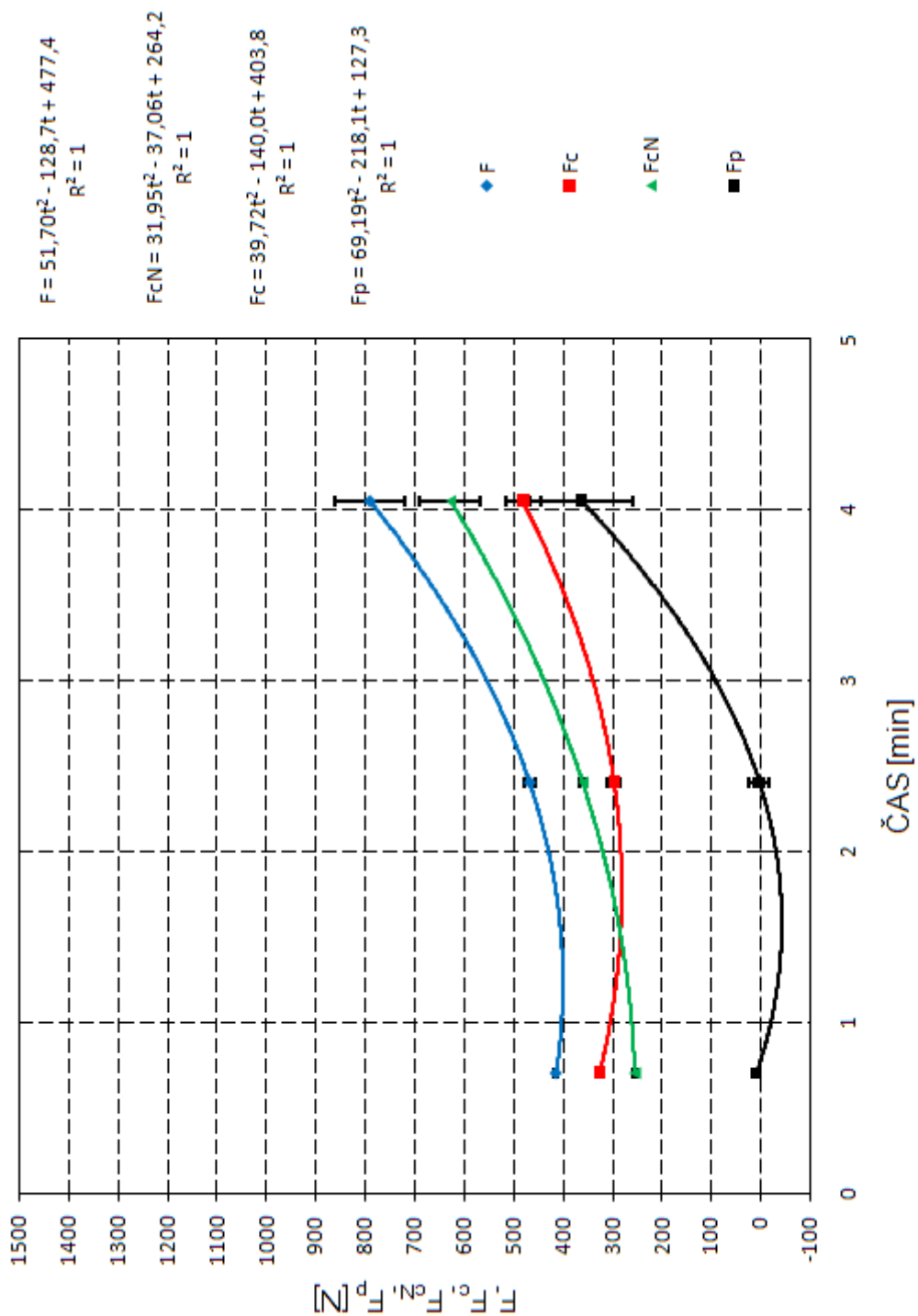
Na (obr. 4.29) je zřetelně vyobrazen nalepený materiál obrobku a opotřebení až na základní substrát nástroje samotného.

(obr. 4.30) vyobrazuje místo, kde došlo k odlomení části povlaku AlTiN. Vzhledem k tomu, že je povlak multivrstvý lze v detailu rozeznat jednotlivé vrstvy.

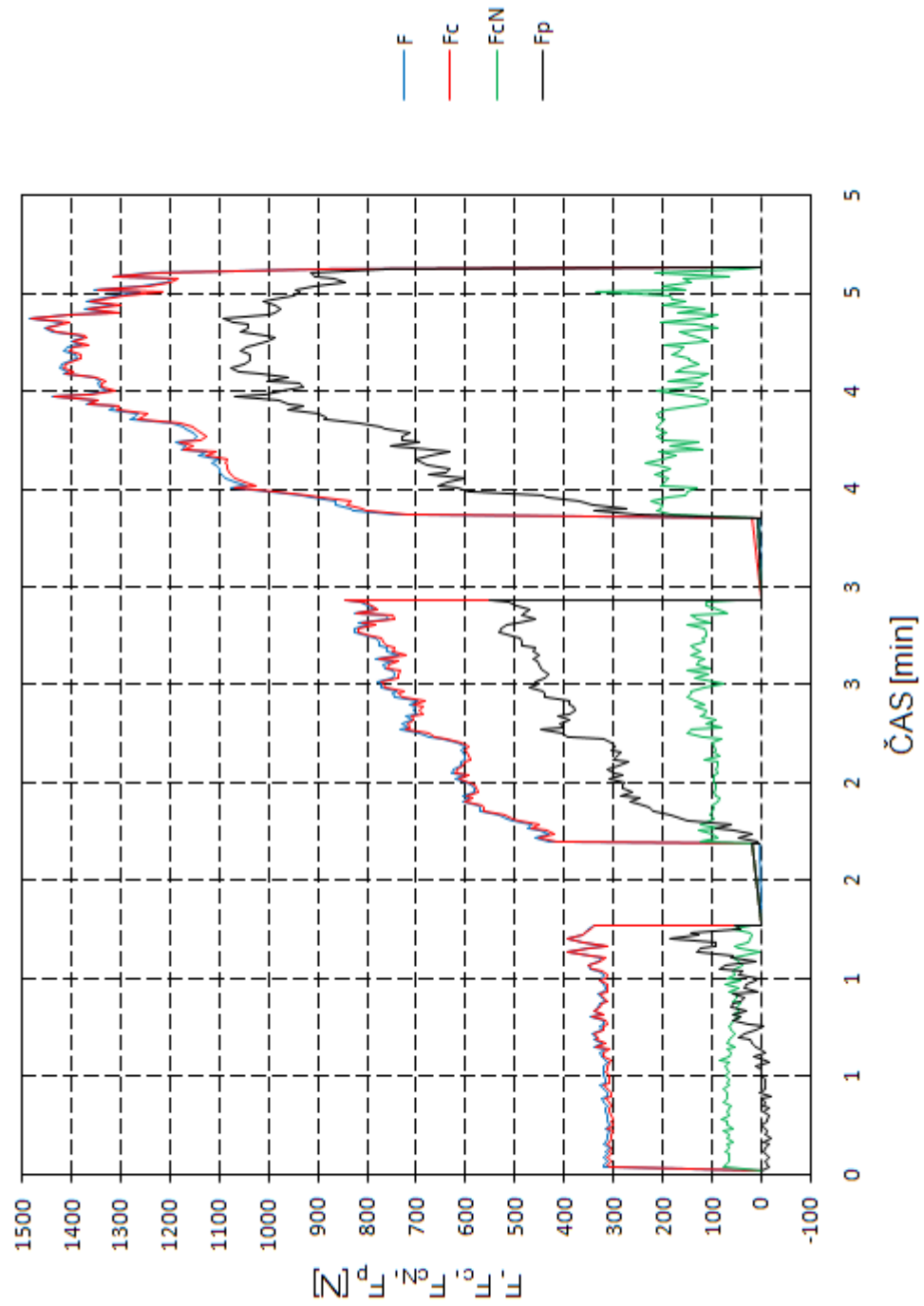
4.4 Grafy silových průběhů HSS Co8



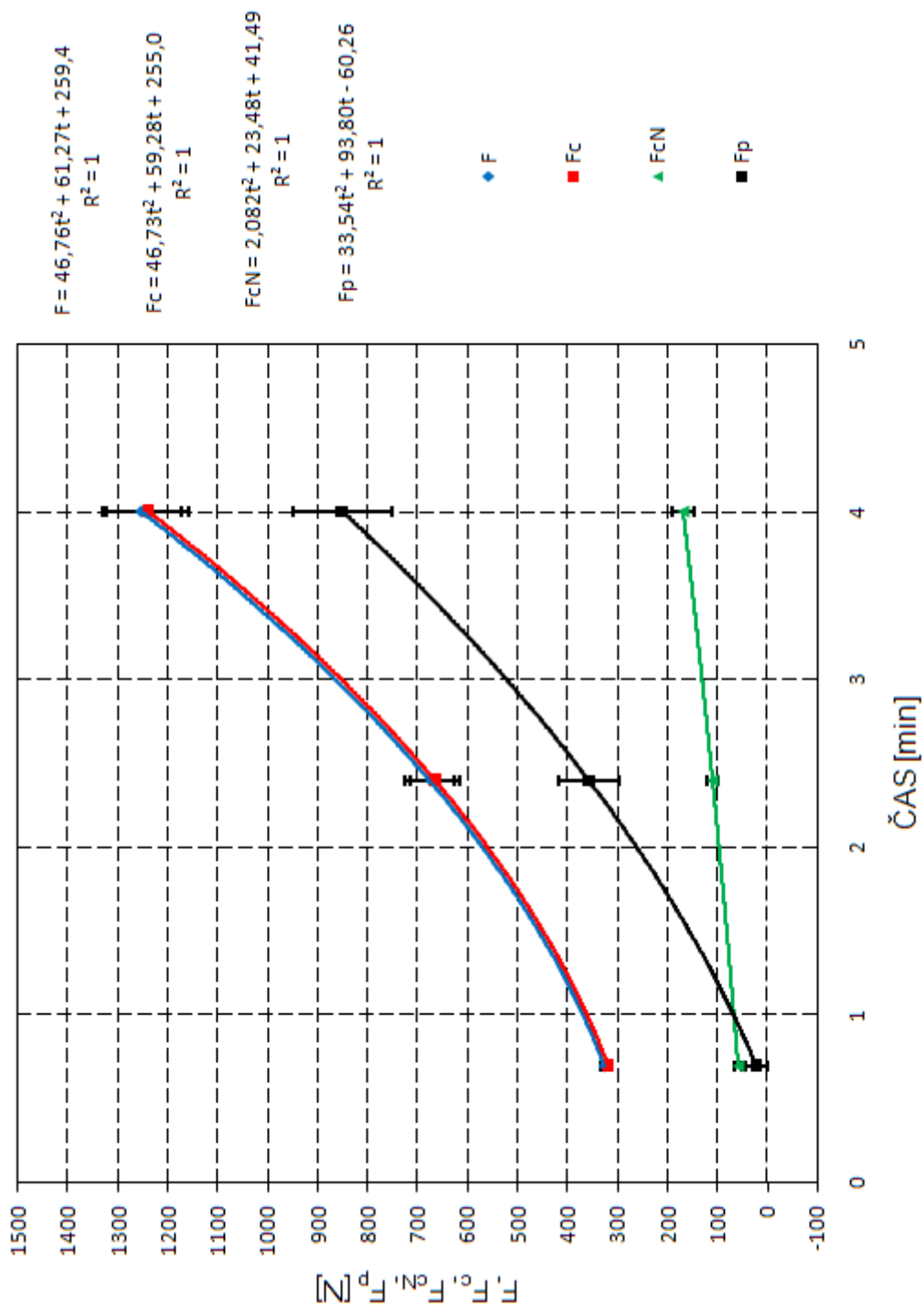
Obr. 4.31 Silový průběh při frézování nástrojem HSS Co8 (nesousledné)



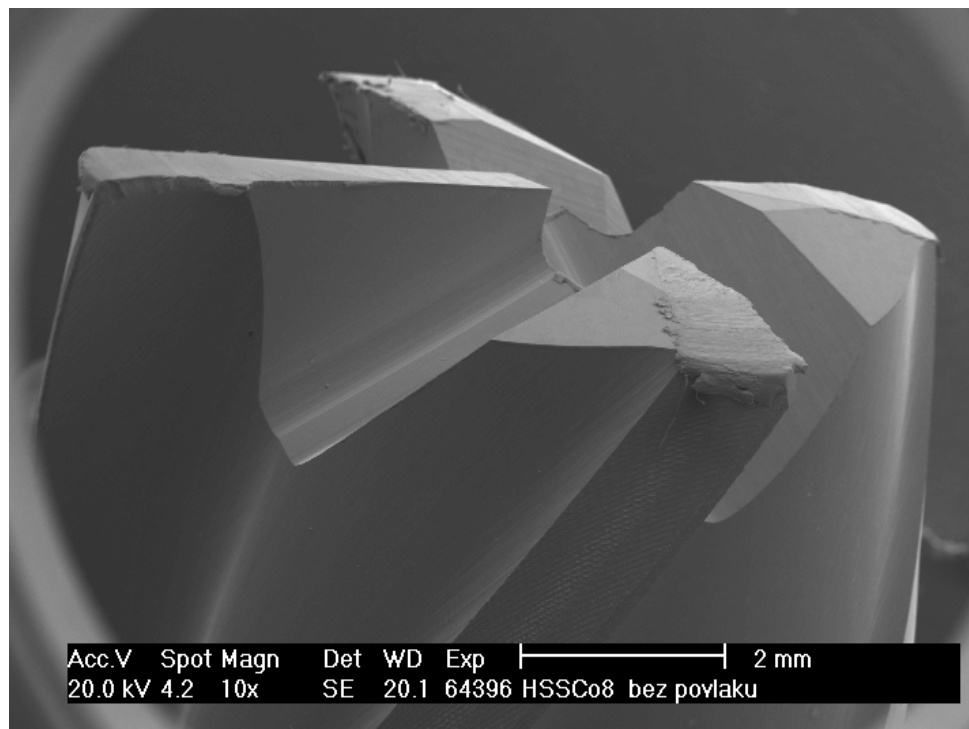
Obr. 4.32 Graf průměrných hodnot sil + rovnice regrese



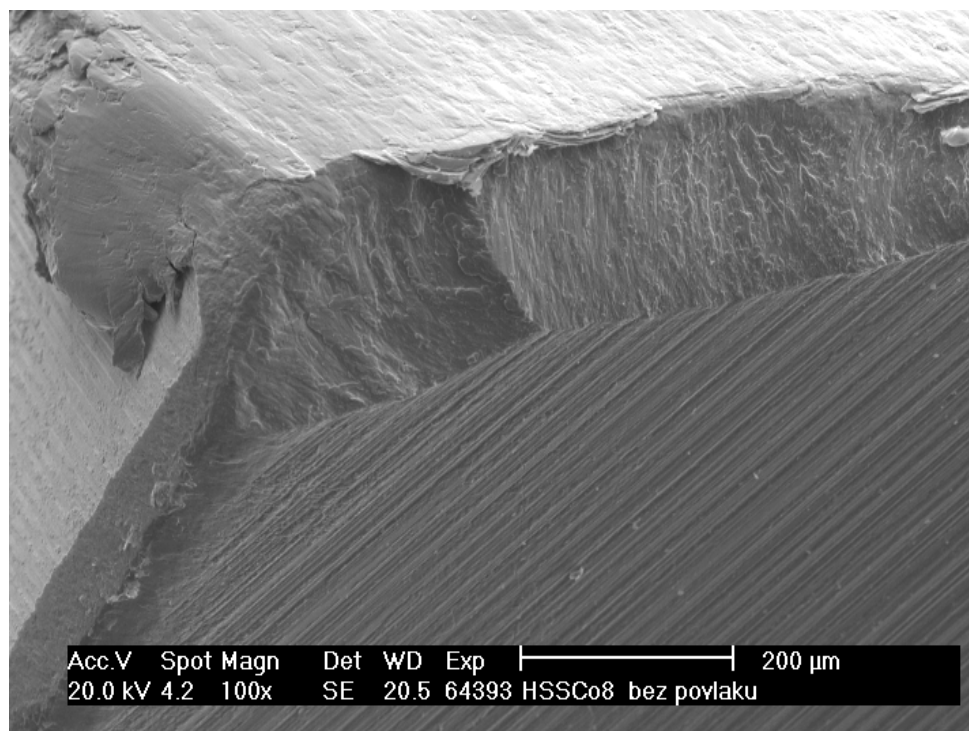
Obr. 4.33 Silový průběh při frézování nástrojem HSS Co8 (sousedné)



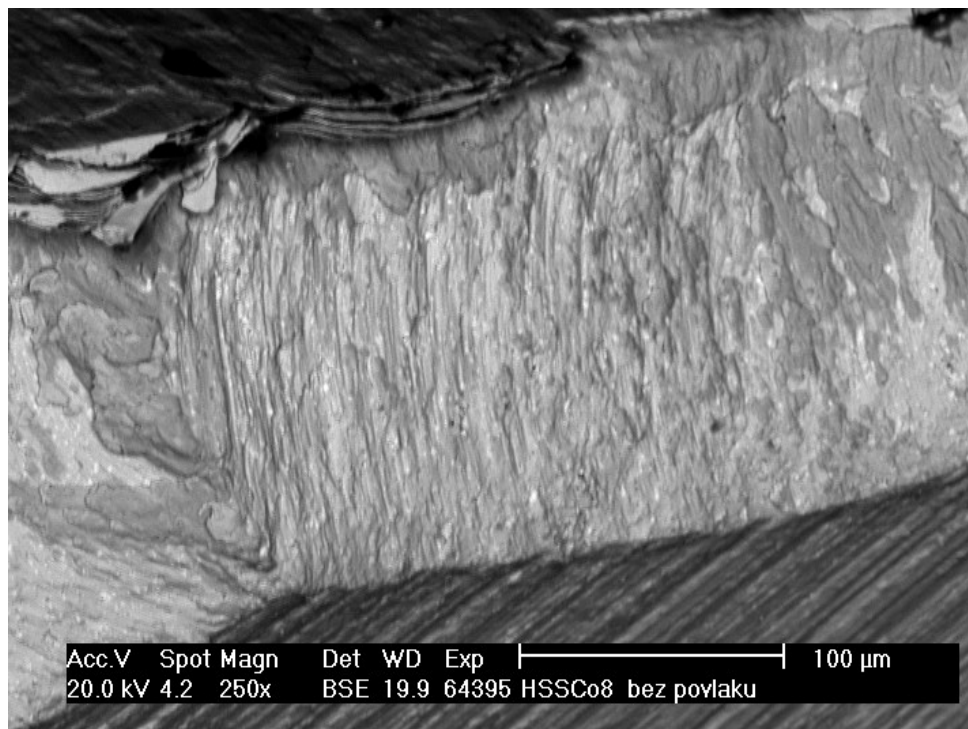
Obr. 4.34 Graf průměrných hodnot sil + rovnice regrese



Obr. 4.35 Čtyřbřitá fréza HSS Co8 po experimentu (sekundární elektrony)
REM 10x



Obr. 4.36 Opatřebené hřbet, břit a fazeta nástroje HSS Co8 (sekundární elektrony)
REM 100x



Obr. 4.37 Detail špičky a břitu nástroje HSS Co8 (zpětně odražené elektrony)
REM 250x

Z (obr. 4.37) je patrné značné opotřebení na špici i břitu nástroje. Vyskytuje se zde několik druhů opotřebení mezi nejvýraznější patří adheze, která se projevuje nalepováním materiálu obrobku na nástroj a vylamování částí ostří.

5 DISKUZE

5.1 Rozbor průběhu sil při obrábění

(obr. 4.1) V průběhu druhého průjezdu nesousledným směrem s největší pravděpodobností dochází k porušení břitu nástroje a to k odlomení části ostří. To má za následek nárůst kolmé řezné síly (F_{cN}) a převýšení řezné síly (F_c) nejen při tomto průjezdu, ale i při všech zbývajících, s výjimkou průjezdu posledního. Vlivem adheze obráběného materiálu silové zatížení klesá, avšak opotřebením je již tak velké, že dochází k vybracím nástroje a není možné pokračovat v dalším obrábění nesousledným směrem.

(obr. 4.3) Silový průběh je stabilnější než v případě obrábění nesousledného a nedochází zde k tak výrazné změně a nárůstu kolmé řezné síly (F_{cN}). V průběhu devátého průjezdu došlo k nárůstu řezné síly (F_c) a to následkem poškození nástroje. Silový pokles ještě v průběhu tohoto řezu mohl být zapříčiněn zpevněným nárůstkem obráběného materiálu na poškozené části nástroje nebo vytvořením ostré hrany vylomením části břitu. V průběhu posledního frézování docházelo k přílišným vibracím a nebylo již možno v obrábění pokračovat.

(obr. 4.13) Při druhém průjezdu nesousledným směrem dochází k poškození nástroje. Projevem tohoto poškození je převýšení kolmé řezné síly (F_{cN}) sílu řeznou (F_c).

(obr. 4.15) Výrazné kolísání řezné síly (F_c) je způsobeno opotřebením.

(obr. 4.22 a 4.24) Silový průběh je obdobný jako na (obr. 4.1 a 4.3). V polovině posledního průjezdu nesousledně, došlo zřejmě k odlomení velké části ostří, jak je vyobrazeno na (obr. 4.27). Průvodním jevem poškození byl vyobrazený silový nárůst.

(obr. 4.31) Již při druhém průjezdu zřejmě došlo k poškození nástroje a nárůstu kolmé řezné síly (F_{cN}), která převýšila řeznou sílu (F_c). Vibrace a jiskření vedlo k ukončení obrábění v nesousledném směru.

(obr. 4.33) Řezná síla (F_c) narůstala v závislosti na čase. Při třetím průjezdu došlo v důsledku nalepení materiálu obrobku (obr. 4.35) na nástroj a vylámání částí břitu k výraznému silovému nárůstu.

Nástroj byl zpočátku obrábění vždy vtahován do řezu. S přibývajícím časem a nárůstem opotřebení se tato skutečnost měnila. Docházelo k růstu pasivní síly (F_p) a vytlačování nástroje z řezu.

6 ZÁVĚR

V diplomové práci byl řešen vliv povlaku na trvanlivost a silové zatížení krátkých fréz čtyřbřítých, které byly vyrobeny z rychlořezné oceli konvenčním způsobem a pomocí práškové metalurgie.

Na základě literárních pramenů bylo shledáno, že:

- moderním trendem výroby nástrojů z rychlořezných ocelí je prášková metalurgie,
- tyto nástroje se povlakuji z důvodu zvýšení trvanlivosti, využití většího rozsahu řezných podmínek a širšího využití nástrojů z rychlořezných ocelí, které dnes představují navýšení trvanlivosti běžně o 200-300%.

V této diplomové práci byly po dohodě s firmou ZPS-FN a.s., Zlín provedeny testy, které prokázaly, že:

- nástroje z rychlořezných ocelí vyráběných práškovou metalurgií (HSSE-PM) a s povlakem AlTiN jsou schopny s ohledem na dané podmínky ($v_c = 41$ [m/min], $f=0,031$ [mm], $a_e = 1$ [mm], $a_p=10$ [mm]) při obrábění materiálu 15 260.9 navýšit trvanlivost téměř o 100%, vzhledem k trvanlivosti nástroje (HSS Co8) s povlakem AlTiN,
- povlak AlTiN při těchto podmínkách ($v_c = 41$ [m/min], $f=0,031$ [mm], $a_e = 1$ [mm], $a_p=10$ [mm]) a materiálu 15 260.9 navýšil trvanlivost nástroje (HSS Co8) téměř o 100% trvanlivosti nástroje nepovlakovaného,
- srovnání nástrojů (HSSE-PM) bez a s povlakem AlTiN nebylo možné objektivně provést, vzhledem ke stavu, ve kterém byl nepovlakovaný nástroj firmou ZPS-FN a.s., Zlín dodán, neboť povrch nástroje byl pórovitý, což negativně ovlivnilo životnost nástroje,
- všechny experimenty byly provedeny bez chlazení, které však bylo výrobcem pro zvolené řezné podmínky a nástroje doporučováno, lze tedy předpokládat, při obrábění s chlazením, prodloužení doby životnosti nástroje.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. 1. Vyd. Praha: MM publishing, s. r. o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2
2. HOLUBÁŘ, P. *Počítačové simulace růstu povlaků a nová řada trojvrstvých povlaků*. [online]. [cit. 2010-15-02]. Dostupné na internetu: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rychlomezne-occele-stale-aktualni>>
3. HOLUBÁŘ, P., CSELLE, T., *Moderní výrobní technologie pro 21. Století*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 232 s. ISBN 978-80-214-3914-6
4. ŠÍMA, Michal. JANKŮ, Roman. *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky*. MM Průmyslové spektrum. Duben 2007, č. 4, s. 72-73, ISSN 1212-2572
5. HOLUBÁŘ, Pavel. CSELLE, Tibor. *Výkonnost nástrojů s moderními PVD povlaky*. MM Průmyslové spektrum. Prosinec 2004, č. 12, s. 86-87, ISSN 1212-2572
6. ŠÍMA, Michal. ZINDULKA, Ondřej. *Měření vlastností povlaků na nástrojích*. MM Průmyslové spektrum. Červen 2004, č. 6, s. 30-31, ISSN 1212-2572
7. HOLUBÁŘ, Pavel. ZINDULKA, Ondřej. ŠÍMA, Michal. *Technologie úprav nástrojů před a po povlakování*. MM Průmyslové spektrum. Září 2005, č. 9, s. 70-72, ISSN 1212-2572
8. OERLIKON BLAZERS. *Technologie povlakování*. [online]. [cit. 2010-16-03]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.oerlikon.com/balzers/cz/>>
9. SHM. *PVD technologie SHM*. [online]. [cit. 2010-17-03]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.shm-cz.cz/cs/technicke-informace/pvd-technologie-shm>>

10. ENGINEER LIVE. *Magnetron sputtering cathodes*. [online]. [cit. 2010-31-03]. Dostupné na Word Wide Web: <http://www.engineerlive.com/Design-Engineer/Materials_Processes/Magnetron_sputtering_cathodes/18921/>
11. ZINDULKA, Ondřej. *Moderní metody povlakování nástrojů*. MM Průmyslové spektrum. Říjen 2004, č. 10, s. 28-29, ISSN 1212-2572
12. HAUZER TECHNO COATING. *Magnetron sputtering*. [online]. [cit. 2010-31-03]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.hauzertechnocoating.com/index/EN/Magnetron%20Sputtering/71/0/>>
13. POVRCHOVÁ ÚPRAVA. *Technologie povlakování nástrojů*. [online]. [cit. 2010-04-04]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.povrchovauprava.cz/uploads/assets/casopisy/pu-2007-03.pdf>>
14. PVD. *Coating thickness tester*. [online]. [cit. 2010-04-04]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.pvd-coatings.co.uk/coating-thickness-tester.htm>>
15. VODIČKA, Miloš. *Současnost a trendy povlakování technologií PVD*. MM Průmyslové spektrum. Duben 2003, č. 4, s. 52-53, ISSN 1212-2572
16. ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s. *Typy povlaků*. [online]. [cit. 2010-12-04]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.zps-fn.cz/html/typy-povlaku-24.html>>
17. NOVÁK, Zdeněk. *Řezné nástroje na IMTS 2006 Chicago*. MM Průmyslové spektrum. Prosinec 2006, č. 12, s. 40-49, ISSN 1212-2572
18. KATALOG DIMAR. *Spirálové frézy z plného materiálu*. [online]. [cit. 2010-14-04]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.dimarky.cz/katalog/cnc.htm#2>>
19. KATALOG ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s. [online]. [cit. 2010-14-04]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.zps-fn.cz/katalog-frez/frezy-valcove-celni/freza-valcova-celni-kratka-1-zub-pres-stred-pm/>>
20. BÖHLER. *Catalog High speed steel*. [online]. [cit. 2010-18-04]. Dostupné na Word Wide Web: <http://www.busmi.com/files/data_sheet_s_500de.pdf>

21. FERONA. *Sortimentní katalog*. [online]. [cit. 2010-28-04]. Dostupné na Word Wide Web: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php>
22. ERASTEEL. *Erasteel PM grades 2030*. [online]. [cit. 2010-28-04]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.erasteelamerica.com/steel-grades.htm>>
23. BOHDAN BALZANO s. r. o. *Nástrojové oceli ASP a CPM*. [online]. [cit. 2010-28-04]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.nastrojovky.cz/download.php?FNAME=1268729350.upl&ANAME=N%C3%A1strojovky+ASP++a+CPM+roz%C5%A1%C3%AD%C5%99en%C3%A9.pdf>>
24. SHM. *Měření jednotlivých vlastností vrstev*. [online]. [cit. 2010-28-04]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.shm-cz.cz/cs/technicke-informace/mereni>>
25. PÍŠKA, M. *Rozvoj moderních strojírenských technologií využitím progresivních CAD-CAM a CNC technologií*. [online]. [cit. 2010-28-04]. Dostupné na Word Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Vybaveni_CNC_KISTLER_JC.pdf>
26. ZOUHAR, J. PÍŠKA, M. *Napjatostně-deformační analýza moderních HSS fréz*. [online]. [cit. 2010-04-05]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/napjatostne-deformacni-analyza-modernich-hss-frez>>
27. BARRANDE. *Laboratoř elektronové mikroskopie*. [online]. [cit. 2010-19-05]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://barrande.nm.cz/index.php?p=6>>
28. ZOUHAR, Jan. *Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky*: Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 104 s., příloh 7. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

29. BYRNE, G. DORNFELD, D. DENKENA, B. *Advancing Cutting Technology*. [online]. [cit. 2010-14-05]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://escholarship.org/uc/item/7hd8r1ft>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

označení	jednotka	popis proměnné
a_p	mm	axiální šířka záběru (hloubka řezu)
a_e	mm	radiální šířka záběru
n	ot/min	otáčky stroje
v_c	m/min	řezná rychlost
v_f	mm/min	posuvová rychlost
f	mm	posuv na zub
D	mm	průměr frézy
d	mm	průměr stopky frézy
l	mm	délka řezné části frézy
L	mm	celková délka frézy
z		počet zubů
F_{1M}	N	celková síla vyvolaná řeznou částí jednoho břitu
$F_{c1} = F_c$	N	řezná síla působící na jeden břit
$F_{cN1} = F_{cN}$	N	kolmá řezná síla působící na jeden břit
$F_{p1} = F_p$	N	pasivní síla působící na jeden břit
F_{f1}	N	posuvová síla působící na jeden břit
F_{x1M}	N	síla působící v ose x stroje a snímače na 1 břit frézy
F_{y1M}	N	síla působící v ose y stroje a snímače na 1 břit frézy
HSS Co8		nástrojová rychlořezná ocel
HSSE-PM		nástrojová rychlořezná ocel vyrobená práškovou metalurgií
PVD		fyzikální metoda povlakování
\emptyset		úhel roviny stříhu
\emptyset_1		počáteční úhel tvorby třísky
\emptyset_2		koncový úhel tvorby třísky (maximální tloušťka třísky)
\emptyset_s		úhel v zadní rovině, odpovídající poloze těžiště plochy nominálního průřezu třísky