



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NOVÉ FRÉZOVACÍ NÁSTROJE Z RYCHLOŘEZNÉ OCELI PRO HRUBOVACÍ OPERACE

NEW MILLING HSS CUTTERS FOR ROUGHING OPERATIONS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. ALEŠ JAROŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2015

Abstrakt

Dizertační práce je zaměřena na návrh, konstrukci a výrobu nového frézovacího nástroje pro hrubovací operace. V prvních kapitolách je podrobně popsána problematika rychlořezných ocelí, povlakovacích metod a technologie frézování. Nosnou částí práce je návrh, konstrukce a výroba frézovacího nástroje, který byl navržen na základě simulace obrábění. Nástroj je konstruován jako tříbřitá válcová čelní stopková fréza vyrobená z rychlořezné oceli, opatřená tzv. kompenzačními břity. Úkolem kompenzačních břitů je snížit, v ideálním případě potlačit, tahovou napjatost v patě zubu. Nástroj byl vyroben pomocí technologie přesného lití, dále následovalo broušení funkčních ploch, tepelné zpracování a depozice PVD povlaků (např. (Al,Ti)N). Navržený nástroj byl porovnán s katalogovými nástroji od společnosti ZPS – Frézovací nástroje. Pro dlouhodobé řezné zkoušky byla použita ocel ČSN 41 2050, frézovalo se za pomoci procesní kapaliny. Měřenými parametry bylo silové zatížení a hřbetní opotřebení břitu nástrojů, dále byla na základě získaných dat provedena statická analýza napjatosti a deformace nástroje. Povlakované nástroje byly dále monitorovány pomocí elektronové mikroskopie.

Klíčová slova

Rychlořezná ocel, frézování, PVD povlakování, rapid prototyping, technologie vytavitelného modelu, silové zatížení, opotřebení břitu.

Abstract

Dissertation thesis is focused on development, design and production of the new milling cutter which is used for roughing operations. High-speed steels, coating technology and milling technology are described in first chapters of dissertation thesis. The main part of this thesis is the design of the new milling cutter that has been designed on the basis of the machining simulation. The milling cutter is designed as a three-flute cylindrical end mill made of high speed steel. The each flute is composed of two special compensation edges. The compensation edges are used for reducing (at best suppression) tensile stress in the heel of the tooth. The milling cutter was made by lost wax technology, followed by grinding and thermal treatment. New designed tools were deposited by PVD coatings (e.g. (Al,Ti)N). Standard catalog milling cutters (producer ZPS - milling tools, Zlín, Czech Republic) were used for comparison the designed milling cutter. Carbon steel CSN 41 2050 (DIN 1.1191) was used for milling, which was carried out with using process liquid. The monitored parameters were force loading, flank wear and tensile stress during milling. The dynamometer Kistler was used for measuring force loading and data obtained during machining was used for stress analysis.

Key words

High-speed steel, milling, PVD coating, rapid prototyping, lost wax technology, force loading, tool wear.

Bibliografická citace

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.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Nové frézovací nástroje z rychlořezných ocelí pro hrubovací operace“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně 2015

Ing. Aleš Jaroš

Poděkování

Děkuji tímto svému vedoucímu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování disertační práce.

Obsah

1 ÚVOD	9
2 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE	11
3 CHARAKTERISTIKA RYCHLOŘEZNÝCH OCELÍ.....	12
3.1 Rozdělení a značení rychlořezných ocelí.....	12
3.2 Základní vlastnosti a použití rychlořezných ocelí	14
3.3 Chemické složení rychlořezných ocelí	15
3.4 Tepelné zpracování a výsledná struktura rychlořezných ocelí	16
4 CHARAKTERISTIKA POVLAKOVACÍCH METOD	20
4.1 Princip a rozdělení fyzikální metody PVD	20
4.1.1 Naprašování	21
4.1.2 Napařování.....	23
4.1.3 Iontová implantace.....	25
4.2 Příprava HSS nástrojů před povlakováním.....	26
4.3 Vlastnosti povlaků a typy jednotlivých nanášených vrstev	27
5 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ.....	30
5.1 Silové účinky při frézování.....	30
6 OPOTŘEBENÍ BŘITU ŘEZNÉHO NÁSTROJE.....	34
7 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE Z RYCHLOŘEZNÝCH OCELÍ	36
7.1 Klasifikace rychlořezných frézovacích nástrojů.....	36
7.2 Výrobci frézovacích nástrojů vyrobených z HSS ocelí	37
7.3 Navržení technologie výroby nového frézovacího nástroje	38
7.4 Konstrukce frézovacího nástroje	40
8 PŘEDBĚŽNÉ ŘEZNÉ ZKOUŠKY	45
8.1 Materiál obrobku.....	45
8.2 Obráběcí stroj.....	45
8.3 Obráběcí nástroj.....	46
8.4 Nastavené řezné podmínky	46
8.5 Průběh experimentu	47
8.6 Průběhy silového zatížení při frézování umělého dřeva.....	48
8.7 Průběhy silového zatížení při frézování hliníkové slitiny	50
8.8 Pevnostní analýza navržené geometrie	51

8.8.1 Předpokládané silové zatížení nástroje	51
8.8.2 Statická analýza napjatosti a deformace nástroje	52
8.9 Opatření břitů	54
8.10 Závěry experimentu	54
9 VÝROBA PROTOTYPU FRÉZOVACÍHO NÁSTROJE.....	56
9.1 Plastový prototyp	56
9.2 Silikonová forma.....	59
9.3 Voskový model	61
9.4 Skořepinová forma.....	63
9.5 Kovový prototyp	66
9.6 Dokončovací operace.....	68
10 OBROBITELNOST RŮZNORODÝCH MATERIÁLŮ	70
10.1 Obráběné materiály	70
10.2 Obráběcí nástroje	71
10.3 Obráběcí stroj.....	72
10.4 Řezné podmínky	73
10.5 Průběh experimentu	74
10.6 Analýza silového zatížení při frézování.....	75
10.7 Průběhy silového zatížení při nesousledném frézování.....	76
10.8 Průběhy silového zatížení při sousledném frézování.....	81
10.9 Zhodnocení obrábění různorodých materiálů	87
11 DLOUHODOBÉ ŘEZNÉ ZKOUŠKY	89
11.1 Obráběný materiál.....	89
11.2 Obráběcí nástroje	89
11.3 Obráběcí stroj.....	91
11.4 Řezné podmínky	91
11.5 Průběh experimentu	91
11.6 Vyhodnocení silového zatížení při sousledném frézování oceli.....	92
11.7 Průměrné hodnoty řezných sil v závislosti na čase.....	98
11.8 Opatření testovaných řezných nástrojů.....	100
11.9 Analýza řezných sil v průběhu opotřebení nástroje.....	104
11.10 Pevnostní analýza napjatosti a deformace nástroje RMC.....	107

11.11 Analýza opotřebení břitů pomocí elektronového mikroskopu	113
11.12 Obrábění drážek	117
Závěry	118
Perspektiva dalších prací	121
Reference	122
Autorovy publikace k danému tématu	130
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	131
Seznam příloh	133
Příloha 1: Silikonová směs SILASTIC ® T-4	134
Příloha 2: Vosk A7-TGG/09.....	136
Příloha 3: Technologie přesného lití pomocí vytavitelného modelu	138
Příloha 4: Použité slévárenské písky pro výrobu skořepinové formy	140
Příloha 5: Pomocné schéma pro výbrus prototypu nástroje	141
Příloha 6: Schéma žíhacího cyklu v peci HV 60/15 oceli 422993PM.....	142
Příloha 7: Schéma kalicího cyklu oceli 422993PM.....	143
Příloha 8: Schéma popouštěcího cyklu oceli 422993PM	144
Příloha 9: Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli ČSN 41 2050	145
Příloha 10: Třísky vzniklé při obrábění oceli ČSN 41 2050.....	146

1 ÚVOD

V dnešní době je kladen velmi velký důraz na produktivitu obrábění, která je přímo úměrná zvolenému řeznému materiálu. Existuje velké množství řezných materiálů, které jsou používány pro výrobu řezných nástrojů. Jsou to rychlořezné oceli, slinuté karbidy, řezná keramika, cermety, polykrystalický kubický nitrid boru a polykrystalický diamant [1].

Rychlořezné oceli (HSS) se používají pro výrobu řezných nástrojů, zejména pro výrobu frézovacích a vrtacích nástrojů. K výraznému rozvoji produkce nástrojů z HSS došlo po zavedení práškové metalurgie do výroby řezných nástrojů a technologie přesného lití. Technologie přesného lití se používá především pro tvarově složité nástroje, jejichž výroba třískovou technologií by byla značně pracná a nákladná, ale také pro výrobu nových prototypů frézovacích nástrojů [2].

Pro zlepšení mechanických vlastností a prodloužení trvanlivosti se na nástroje nanášejí povlaky. Pro povlakování HSS nástrojů se používá metoda fyzikální – tzv. Physical Vapour Deposition (PVD), která probíhá za nižších teplot než metoda chemická – tzv. Chemical Vapour Deposition (CVD), nedochází tedy k teplotnímu ovlivnění již dříve zušlechtěného nástroje. Povlaky jsou na nástroje nanášeny jako jednovrstvé nebo multivrstvé. Výhodou multivrstvých povlaků je, že zpomalují šíření trhlin směrem od povlaku k substrátu a prodlužují tím trvanlivost nástroje. Nejčastěji nanášenými PVD povlaky na nástroje z HSS jsou TiN, TiC, Ti(C,N), (Al,Ti)N, (Ti,Al)N atd. Trendem dnešní doby je přidávání dalších chemických prvků do již známých PVD povlaků, nejčastěji přidávanými prvky jsou chrom a křemík [3-5].

Povlakování nástrojů je velice důležitým, ale ne jediným parametrem, který může pozitivně ovlivnit trvanlivost nástroje a kvalitu obrobené plochy. Mezi další důležité parametry patří vhodně zvolený obráběcí stroj, obráběný materiál, druh operace, geometrie nástroje, materiál nástroje, nastavené řezné podmínky a vhodně zvolená procesní kapalina [6].

Při obrábění, kdy dochází k velkému úběru materiálu, je velmi důležitým parametrem vhodně zvolená procesní kapalina, která nemá za úkol jen chladit nástroj v místě řezu, důležitý je také mazací a čistící účinek. Nejvhodnějším způsobem přívodu procesní kapaliny do místa řezu je vnitřní chlazení, protože procesní kapalina je fokusovaná přímo do místa řezání a umožňuje tak zvýšení řezné rychlosti a dochází k výraznému zvýšení výkonu obrábění [4,7].

Frézy s přímými zuby jsou náchylné k rázům, které vznikají při najetí nástroje do záběru. Z tohoto důvodu, je převážná většina čelních válcových stopkových fréz konstruována se zuby ve šroubovici (nástroje mají různý úhel stoupání šroubovice). Konvenční nástroje s pozitivní geometrií jsou náchylné na osové tahové namáhání, které způsobuje, že nástroje jsou vytahovány z řezu, dochází ke chvění a podřezání povrchu. Nástroje s negativní geometrií jsou náchylné na osové tlakové namáhání. Z těchto důvodů je patrné, že je složité nalézt optimální geometrii řezného nástroje.

Prvním krokem při návrhu konstrukce nového prototypu řezného nástroje je třeba stanovit, jakým způsobem bude nástroj vyráběn. Mezi nejpoužívanější technologie patří broušení na kulato a technologie přesného lití do připravených skořepinových forem. V případě broušení na kulato je třeba znát rozměry brousicích kotoučů pro vyřezání šroubovité drážky, popřípadě brousicí kotouč vyrobit nový tak, aby svými rozměry

odpovídal šroubovitě drážce nástroje. Výroba nástrojů pomocí technologie přesného lití není limitována rozměry broušícího kotouče. Na základě vytištěného 3D modelu (tzv. „master model“) je vyrobena forma (nejprve silikonová, dále skořepinová), která odpovídá vnějším rozměrům navržené geometrie nástroje. Po odlití prototypů jsou funkční plochy nástroje broušeny. Dále je nástroj tepelně zpracován a deponován PVD povlakem.

2 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce byl návrh, konstrukce a výroba frézovacího nástroje pro velký úběr materiálu. Nový nástroj byl konstruován jako tříbřitá válcová čelní stopková fréza, vyrobená z rychlořezné oceli, opatřená tzv. kompenzačními břity. Úkolem kompenzačních břitů je snížit, v ideálním případě potlačit, tahovou napjatost v patě zubu. Hodnocenými parametry bylo silové zatížení a hřbetní opotřebení nástroje. Z dat získaných při řezných zkouškách byla provedena statická analýza napjatosti a deformace nástroje.

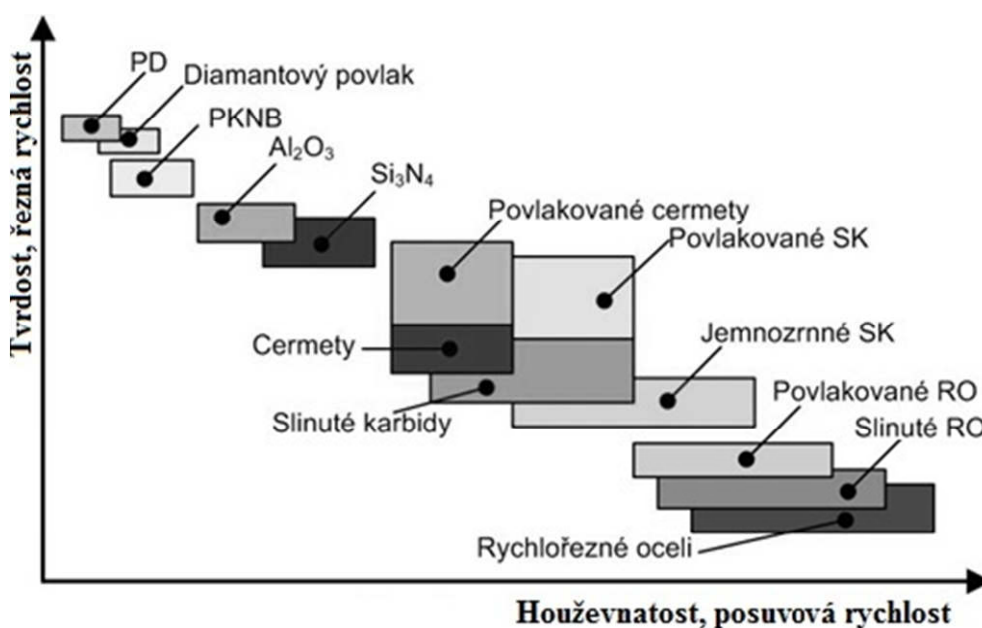
Stanoveného cíle bylo dosaženo na základě těchto kroků:

- analýza současného stavu poznání, teoretické východiska,
- průzkum trhu výrobců HSS nástrojů,
- porovnání designu a geometrie stávajících stopkových fréz,
- porovnání nanášených PVD vrstev,
- návrh výroby nového řezného nástroje,
- konstrukce 3D modelu nového frézovacího nástroje v programu Autodesk Inventor,
- 3D tisk prototypu nástroje metodou Fused Deposition Modelling (FDM),
- výroba silikonové formy,
- výroba voskových modelů nástroje,
- výroba skořepinové formy,
- odlití prototypu nástrojů pomocí technologie přesného lití,
- přebroušení funkčních ploch prototypu nástroje,
- tepelné zpracování (kalení a popouštění),
- depozice PVD povlaků,
- volba vhodného obráběcího stroje,
- volba vhodného obráběného materiálu,
- výběr katalogových nástrojů pro porovnání hodnocených parametrů,
- vyhodnocení silového zatížení při frézování,
- vyhodnocení opotřebení břitů nástroje,
- vyhodnocení pevnostní analýzy.

3 CHARAKTERISTIKA RYCHLOŘEZNÝCH OCELÍ

Rychlořezné oceli (HSS, RO) tvoří podskupinu ocelí, které jsou označovány jako nástrojové (NO). Již z názvu je patrné, že se jedná o oceli, které jsou předurčeny pro výrobu řezných nástrojů, např. soustružnických nožů, vrtáků, fréz, protahováků, protlačováků, atd. Největší zastoupení na trhu HSS nástrojů vyrobených tvoří šroubovitě vrtáky, nástrčné a stopkové frézy [8].

Za předchůdce rychlořezných ocelí lze považovat ocel, která byla navrhována v roce 1900, o složení 1,85% C, 8% W, 7,8% Cr, 0,3% Mn, které bylo později upraveno na 0,7% C, 19% W, 5,5% Cr a 0,3% V. Tento řezný materiál umožňoval obrábění s tvorbou třísek rozžhavených do červena, což do té doby znamenalo okamžité zničení nástroje. Řezná rychlost byla zvýšena z 5 m/min na 35 m/min, a proto byl tento materiál označen jako **High Speed Steel** [8].



Obr. 3.1 Přehled nástrojových materiálů, dlouhodobý vývojový trend [3].

Podle chemického složení [8] se nástrojové oceli rozdělují:

- nelegované (uhlíkové) oceli,
- nízko až středně legované oceli,
- vysokolegované (rychlořezné) oceli.

3.1 Rozdělení a značení rychlořezných ocelí

Rychlořezné oceli spadají do skupiny vysokolegovaných nástrojových ocelí a je možné je rozdělit podle několika hledisek: podle chemického složení, výkonu nebo technologie výroby.

Podle výkonu [2] lze HSS rozdělit:

- pro běžné použití,
- výkonné,
- vysoce výkonné.

Oceli s vysokým výkonem se používají pro obrábění materiálů o vysoké pevnosti nebo pro obrábění běžných materiálů vysokými rychlostmi. Oceli výkonné jsou vhodné pro obrábění materiálů s pevností okolo 900 MPa při průměrných řezných rychlostech. Oceli pro běžné použití se používají pro obrábění materiálů do pevnosti 850 MPa nízkými řeznými rychlostmi [2].

Podle technologie výroby [2] lze HSS rozdělit:

- tvářené,
- lité,
- vyráběné práškovou metalurgií.

Tvarově složité nástroje jsou vyráběny metodami přesného lití, protože jejich výroba klasickou třískovou technologií by byla značně obtížná a nákladná. Dlouholeté zkušenosti ukázaly, že i při nižší houževnatosti odlévaných ocelí je možné úspěšně odlévat i nástroje, které pracují s **přerušovaným řezem – frézy** [2].

Ocel na odlitky ČSN 42 2992 má téměř identické složení jako klasická tvářená ocel 19 802 (ČSN 41 9802) a je vhodná především pro obrábění ocelí nižších pevností. Pro nástroje, které pracují s přerušovaným řezem, se odlévají oceli, jejichž složení odpovídá tvářené oceli 19 830 (ČSN 41 9830) [2,7]. HSS vyrobené pomocí práškové metalurgie mají oproti běžným (tvářeným) ocelím lepší obrobiteľnosť a vyšší houževnatost [10]. Nevýhodou takto vyrobených ocelí je vyšší obsah kyslíku, který je možný snížit vhodným tepelným zpracováním (žháním). Jsou vhodné pro všechny typy nástrojů a pro všechny druhy obrábění [11].

***Poznámka:** Rozdělení podle výkonu a podle způsobu výroby se dnes už používá jen výjimečně a je možné jej nalézt ve starší odborné literatuře, nejpoužívanějším rozdělením rychlořezných ocelí je rozdělení podle chemického složení.*

Podle chemického složení [9] lze HSS oceli rozdělit:

- wolfram-chrom-vanadové oceli,
- wolfram-chrom-molybden-vanadové oceli,
- wolfram-chrom-vanad-kobaltové oceli,
- wolfram-chrom-molybden-vanad-kobaltové oceli.

Tab. 3.1 Rozdělení a označování nástrojových ocelí [8].

Nástrojové oceli	Nelegované (uhlíkové)	Legované (nízko a středně legované)	Rychlořezné (vysokolegované)
Označení dle ČSN	19 0xx-19 2xx	19 3xx-19 7xx	19 8xx
Obsah uhlíku [%]	0,3-0,4	0,8-1,2	0,7-1,3
Obsah legur [%]	< 1	10-15	10-30
Legující prvky	Mn, Cr, Si	Cr, W, Mo, V, Mn, Si, Ni	W, Mo, Cr, V, Co
Kalící prostředí	voda	Olej	vzduch, vakuum
Tvrdost [HRC]	62-64	66	64-68
Použití	ruční nářadí - pilníky, pilky, atd.	řezné nástroje pro řezné rychlosti (do 25 m/min) – vrtáky, protahovací trny, frézy, soustružnické nože	řezné nástroje pro řezné rychlosti (do 40 m/min) – vrtáky, výstružníky, frézy, závitníky, výhrubníky

Podle norem EU se nástrojové oceli označují jako HS x-x-x-x, kde jednotlivé číslice zohledňují procentuální obsah nejdůležitějších legujících prvků. Jsou to chemické prvky v pořadí wolfram (W), molybden (Mo), vanad (V) a kobalt (Co) [8].

Např.:

Ocel 19 861 (ČSN 41 9861) je v rámci norem EU označena jako **HS 10-4-3-10**, kde: **HS** (= rychlořezná ocel);

10 = 10% W,

4 = 4% Mo,

3 = 3% V,

10 = 10% Co,

- dále ocel standardně obsahuje 4% Cr [8].

3.2 Základní vlastnosti a použití rychlořezných ocelí

Rychlořezné oceli jsou charakteristické střední odolností proti opotřebením, dobrou houževnatostí, vysokou lomovou pevností a tvrdostí. Tyto vlastnosti jim dávají široké pole uplatnění. Tvrdost je velice důležitým faktorem, který zajišťuje odolnost proti opotřebením. Při běžné průmyslové výrobě se pohybuje v rozmezí (63-65) HRC, u některých typů ocelí až 67 HRC. Další důležitá vlastnost je houževnatost, která závisí především na obsahu jednotlivých legovacích prvků, ale také na kalící a popouštěcí teplotě, dále i na teplotě břitů při samotném obrábění [2].

Pevnost v ohybu je ovlivněna velikostí a rozložením karbidů v základní matici, hrubostí výchozího martenzitu a stupněm popouštění (přesycením martenzitu uhlíkem), obsahem zbytkového martenzitu a čistotou oceli. Pevnost v ohybu se zvyšuje především při prvním popouštěcím cyklu. Pevnost v ohybu se u známých HSS pohybuje v rozmezí (3000 – 4000) MPa [2].

Rychlořezné oceli jsou nejčastěji používány pro obráběcí nástroje, např. vrtáky, výstružníky, soustružnické nože, frézy, protahovací trny, atd.

Tab. 3.2 Vlastnosti a použití vybraných rychlořezných ocelí [8].

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

3.3 Chemické složení rychlořezných ocelí

Ve struktuře většiny rychlořezných ocelí se vyskytuje méně než 1% uhlíku (C). Obsah legovacích prvků se pohybuje podle typu oceli v rozmezí 10 až 30%. Většina základních legovacích prvků je karbidotvorných (W, Cr, V, Mo), dalším důležitým legovacím prvkem je kobalt (Co) [2].

Obsah uhlíku (C) ovlivňuje řezivost, která se stoupajícím procentem roste, dále uhlík ovlivňuje mechanické vlastnosti a tepelné zpracování ocelí.

Základním legovacím prvkem HSS ocelí je wolfram. Část wolframu (W) je vázána na uhlík a část je rozpuštěna v základní matici. Nerozpuštěné karbidy wolframu brání růstu zrna austenitu a po zakalení a popouštění zvyšují odolnost proti opotřebení. Obsah W se pohybuje v rozmezí (10 až 18) % [2,8].

Molybden (**Mo**) má na základní vlastnosti oceli podobný vliv jako wolfram. Molybdenové HSS mají však vyšší houževnatost, proto jsou vhodné pro nástroje pracující s přerušovaným řezem - frézy. Molybden může plně nahradit wolfram v poměru 1:2. Část molybdenu je rozpuštěna v základní matici a část tvoří sekundární karbidy M_6C . Při tepelném zpracování se část sekundárních karbidů rozpustí v austenitu, zbytek zůstává nerozpuštěn a zpomaluje hrubnutí zrna [2].

Část chromu (**Cr**) je rozpuštěna v základní matici a část tvoří karbid $M_{23}C_6$, který se při austenitizaci zcela rozpustí. Rozpuštěný chrom zvyšuje prokalitelnost, uhlík zakalitelnost. Rozpuštěný uhlík snižuje teplotu M_s a M_f , tudíž v matici zůstane větší množství zbytkového austenitu. Aby bylo množství zbytkového austenitu co nejmenší, pohybuje se obsah chromu okolo 4% [2].

Dalším důležitým legovacím prvkem je vanad (**V**), jehož slučitelnost s uhlíkem je vysoká, a proto tvoří velmi tvrdé karbidy (M_4C_3), které jsou podstatně tvrdší než karbidy ostatních legovacích prvků. Při ohřevu na kalící teplotu se rozpustí v austenitu a při popouštění se vylučuje jako karbid vanadu, který značně přispívá ke vzniku tzv. sekundární tvrdosti. Drobné karbidy vanadu se rozpouštějí až při vysokých teplotách, při výdrži na kalící teplotě zůstávají převážně v matici a brání tak růstu zrna [2,8].

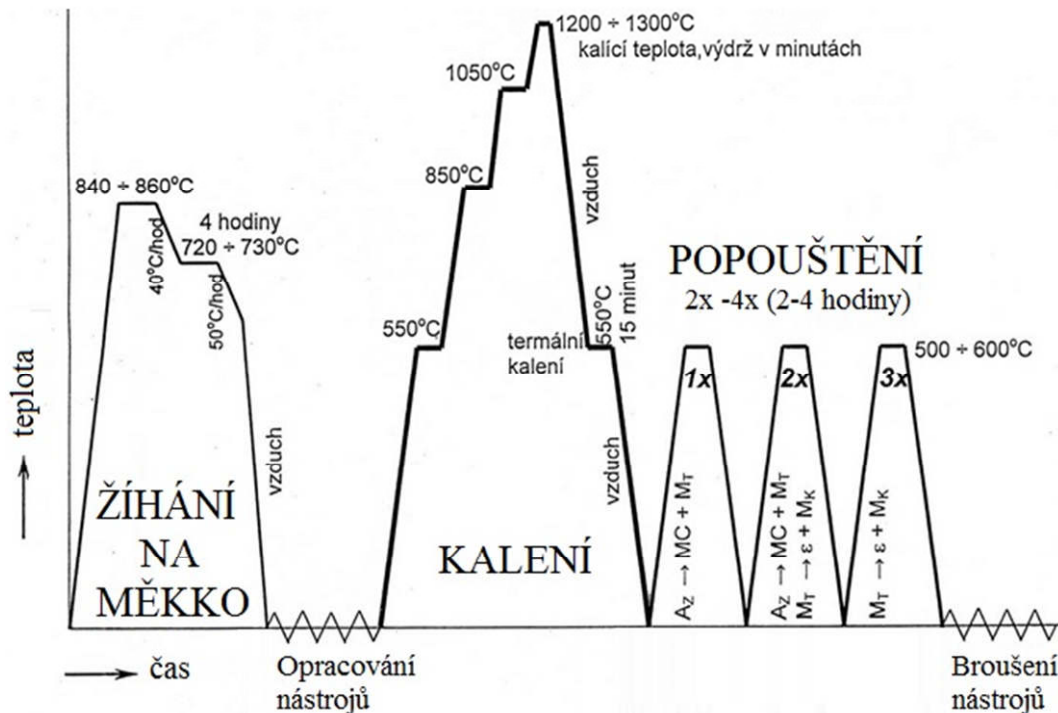
Kobalt (**Co**) jako jeden z mála legovacích prvků netvoří v ocelích karbidy. Po zakalení se převážná většina (až 98%) rozpustí v základní matici. Kobalt zvyšuje odolnost proti popouštění. Nevýhodou kobaltových ocelí je jejich větší sklon k oduhlíkování při tepelném zpracování, nižší pevnost a houževnatost [2].

Tab. 3.3 Chemické složení vybraných druhů rychlořezných ocelí [8].

Druh HSS oceli	Značení dle ČSN	C [hm%]	Cr [hm%]	W [hm%]	Mo [hm%]	V [hm%]	Co [hm%]
18% W	19 855	0,70	4,2	18,0	-	1,5	4,8
	19 859	0,50	4,2	18,0	-	1,75	9,5
	19860	0,75	4,2	18,0	0,7	1,60	9,5
10% W	19856	0,95	4,2	10,2	-	2,35	5,0
	19857	0,95	4,2	10,2	-	2,35	9,8
W + Mo	19 850	0,95	4,2	5,8	5,0	2,00	8,0
	19 852	0,85	4,2	6,2	4,8	1,85	5,0
W+Mo	19 858	1,35	4,4	12,0	-	4,25	5,0
W+Mo+V	19 861	1,25	4,1	10,2	3,8	3,30	10,5

3.4 Tepelné zpracování a výsledná struktura rychlořezných ocelí

Mezi tepelné zpracování (TZ) patří **žihání**, **kalení** a následně několikanásobné **popouštění** (obr. 3.2). Žihání naměkko probíhá za teplot okolo 600°C a má za úkol snížit tvrdost polotovaru a zlepšit jeho obrobitelnost před samotným obráběním. Po obrobení nového nástroje následuje kalení, které má za úkol zvýšit tvrdost nástroje, po kalení následuje několikanásobné popouštění, protože po zakalení není dosaženo požadované tvrdosti nástroje [2].



Obr. 3.2 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí [9].

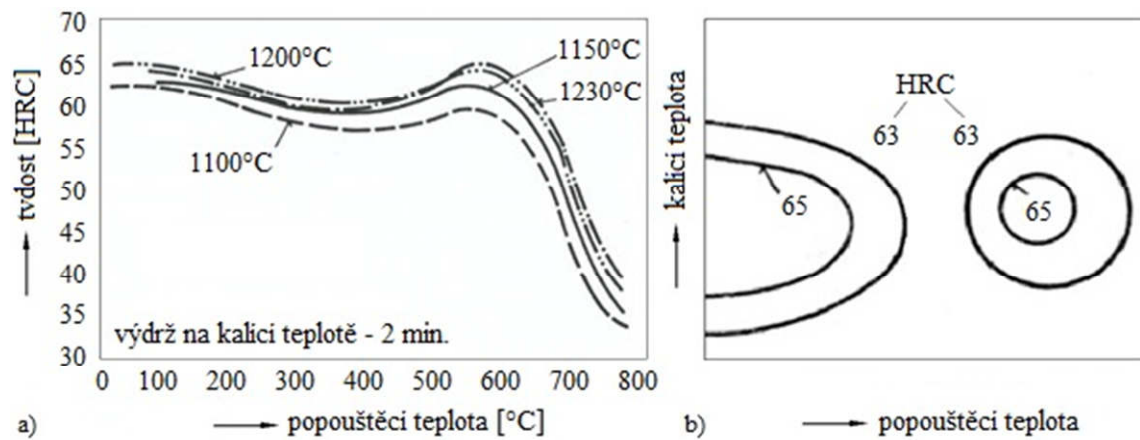
Z toho důvodu, že se ve struktuře HSS vyskytuje velké množství karbidotvorných prvků, není po zakalení dosaženo nejvyšší tvrdosti. Požadované tvrdosti je dosaženo až následným několikanásobným popouštěním. Tento jev je v běžné praxi označován jako **sekundární tvrdost** [2]. Sekundární tvrdost je způsobena tím, že po zakalení homogenního austenitu zůstává ve struktuře velké množství zbytkového austenitu (až 70 %) a HSS mají nižší tvrdost. Při vyšších popouštěcích teplotách (500 až 600) °C dochází ke zvýšení tvrdosti, z důvodu rozpadu zbytkového austenitu a precipitaci velmi jemných karbidů přísadových prvků [2,8].

Podmínkou pro získání sekundární tvrdosti je dostatečně vysoká kalící teplota (až 1270 °C). Až při této vysoké kalící teplotě dojde k rozpuštění všech karbidů, výdrž na teplotě se pohybuje jen po dobu několika minut a to z toho důvodu, aby nedošlo ke zhrubnutí zrn austenitu. Ohřev je zpravidla stupňovitý (ve většině případů dva až tři stupně) z toho důvodu, že HSS ocel je citlivá na prudký ohřev. Kalí se podle velikosti průřezu nástroje na klidném nebo proudícím vzduchu [2,8].

Popouštět se má ihned po zakalení. Popouštěcí teploty se pohybují v rozmezí (500 až 600)°C. Po popouštění je zásadou ochlazovat na vzduchu. Při prvním popouštěcím cyklu dochází k popouštění primárně vzniklého martenzitu a k precipitaci velmi jemných karbidů. Při chladnutí z této teploty dojde k rozpadu části zbytkového austenitu na martenzit, který se poté popouští druhým popouštěcím cyklem, při němž se opět další, již menší část zbytkového austenitu přemění opět na martenzit. Z tohoto důvodu se v některých případech popouštění opakuje třikrát až pětkrát. Výdrž na popouštěcí teplotě se pohybuje podle druhu rychlořezné oceli okolo 1,5 hodiny [2,8,13].

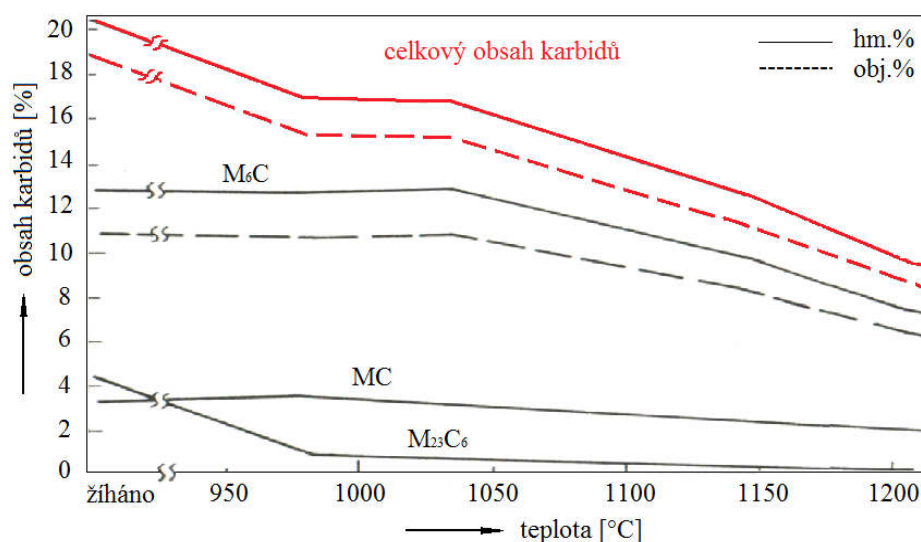
Vliv kalících a popouštěcích teplot na výslednou tvrdost HSS ocelí zobrazují tzv. **popouštěcí křivky** a **vrstevnicové diagramy** (obr. 3.3), ve kterých jsou vrstevnicemi

spojeny stejné tvrdosti získané po kalení z různých teplot a po popouštění na odstupňovaných teplotách [2].



Obr. 3.3 Popouštěcí křivka (a) a vrstevnicový diagram oceli 19 830 (b) [2].

Ve struktuře HSS ocelí se po skončeném tepelném zpracování vyskytuje **martenzit**, **zbytkový austenit** a **karbidy**. Martenzit je přesycený tuhý roztok uhlíku v železe alfa, který vzniká při ochlazení austenitu nadkritickou ochlazovací rychlostí. Jedná se o žádoucí strukturu, která má vysokou tvrdost a pevnost, je však velmi křehký. Množství zbytkového austenitu ve struktuře oceli závisí především na obsahu uhlíku a legujících prvků rozpuštěných v austenitu po výdrži na kalící teplotě, jedná o nežádoucí strukturu. Karbidy se vyskytují v matici HSS a jsou tvrdší než základní matrice, čímž zvyšují odolnost proti opotřebení. Jejich vliv je tím větší, čím vyšší je jejich tvrdost a plocha povrchu. Jedná se o žádoucí strukturu [12-14].



Obr. 3.4 Vliv kalící teploty na množství karbidů v matici oceli 19 830 [2].

Vlastnosti rychlořezných ocelí po zakalení jsou do značné míry ovlivněny velikostí zrna austenitu a změnou obsahu přísadových prvků v základní matici následkem rozpuštění karbidů při ohřevu na kalící teplotu. Na rozpuštění karbidů má vliv především jejich velikost a druh [2,12,14].

Hlavním karbidem, vyskytujícím se v HSS ocelích, je karbid typu M_6C , který krystalizuje v kubické mřížce, jehož složení se mění v rozmezí Fe_4W_2C až Fe_3W_3C . Při nízkých hodnotách atomového poměru $W:C$ se v oceli vyskytuje karbid typu $Cr_{23}C_6$ (krychlová mřížka). Chrom může být nahrazen železem až asi do 30%, za předpokladu přítomnosti určitého množství wolframu, bez něhož se struktura karbidu $(Cr, Fe)_{23}C_6$ stane nestabilní a místo něj se vytvoří cementit. Při dostatečném množství wolframu může být chrom úplně nahrazen železem a karbid nabude složení $Fe_{21}W_2C_6$. Vzhledem k těmto skutečnostem je karbid označen obecně jako $M_{23}C_6$. Jestliže ocel obsahuje (0,7 až 1)% V, začíná se objevovat samostatný karbid vanadu. Karbid vanadu krystalizuje s deficitem uhlíku, takže se někdy označuje jako V_4C_3 , může rozpouštět malé množství železa, wolframu a chromu. Je pravděpodobné, že existuje spojitá řada složení MC až M_4C_3 [2,14].

Tab. 3.4 Přehled karbidů vyskytujících se v rychlořezných ocelích [9].

Karbid	Tvrдость [HV 0,1]	Prvky	Poznámka
$M_{23}C_6$	1000-1100	Cr	Při ohřevu na kalící teplotu se zcela rozpustí, chrom přechází do tuhého roztoku a zvyšuje prokalitelnost oceli.
M_6C	1200-1300	W	Při ohřevu na kalící teplotu se zčásti rozpustí v austenitu, zčásti zůstává zachován a omezuje růst zrna austenitu.
MC (M_4C_3)	2200-3000	V	Jemné velmi tvrdé karbidy, které se při austenitizaci jen zčásti rozpustí a zabraňují zhrubnutí austenitického zrna. Dále precipitují ve struktuře při popouštění (500-600)°C
M_2C	1700-1900	W,Mo	Precipitují ve struktuře při popouštění (500-600)°C
M_3C	asi 950	Fe,	Karbid cementitického typu, je relativně měkký. Precipitují ve struktuře při popouštění

Při austenitizačním ohřevu se karbidy rozpouštějí v pořadí $M_{23}C_6$, M_6C , MC. Při ohřevu nad 1100°C je karbid $M_{23}C_6$ zcela rozpuštěn, M_6C částečně a MC se těžko rozpouští i za teploty 1200°C. Změna složení tuhého roztoku tedy závisí na teplotě a době austenitizace. Z uvedených skutečností vyplývá, že se při nízkých teplotách (900-1100)°C austenit obohacuje chromem. Ohřev na vyšší teplotu (1100-1200)°C vede k obohacování základní hmoty wolframem a vanadem. Ohřevem na teplotu 1250°C se dosáhne dalšího rozpuštění wolframu a zejména vanadu. Tvrдость oceli v kaleném stavu se zvyšováním teploty austenitizace nejprve roste následkem zvyšování obsahu uhlíku v austenitu. Při dalším zvyšování teploty se tvrдость oceli po zakalení snižuje, protože roste obsah zbytkového austenitu. Teplota, při níž začíná nadměrný růst austenitického zrna, závisí na množství a tvaru karbidů, které zůstávají v základní matici zachovány jako nerozpuštěný podíl. Množství a tvar karbidů závisí na chemickém složení a předchozím zpracování oceli [2,14].

4 CHARAKTERISTIKA POVLAKOVACÍCH METOD

Povlaky jsou na řezné nástroje nanášeny z důvodu zlepšení mechanických vlastností, zvýšení řezné a posuvové rychlosti při obrábění, ale také výrazně prodlužují životnost řezných nástrojů. Mezi nejdůležitější mechanické vlastnosti patří tvrdost a odolnost proti opotřebení. Tloušťka naneseného povlaku se v dnešní době, v závislosti na použité metodě povlakování, pohybuje v rozmezí (1 až 7) μm .

Existují dvě základní metody [3,43], které se používají pro nanesení velmi tvrdých tenkých vrstev – povlaků na řezné nástroje]:

- **Metoda PVD (Physical Vapour Deposition)**

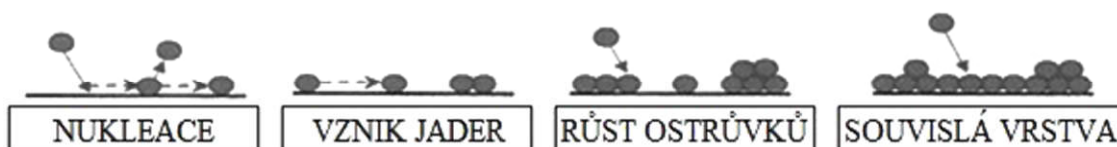
Pro metodu PVD jsou charakteristické nízké pracovní teploty, které se běžně pohybují pod 500°C . Tato metoda byla vyvinuta pro povlakování nástrojů z HSS ocelí, protože na základě nízké teploty depozice povlaku nedochází k teplotnímu ovlivnění již dříve tepelně zpracovaného (zušlechtěného) nástroje. Dnes se tato metoda běžně používá i pro nástroje ze slinutých karbidů (SK) [3]. Metoda PVD je podrobně rozebrána v publikacích [3,4,18,20,21,35].

- **Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition)**

Tato metoda probíhá za vysokých teplot ($1000-1200^\circ\text{C}$) a až do počátku 90. let 20. století byla hlavní metodou pro povlakování nástrojů ze SK. Metoda je založena na reakci plynných chemických sloučenin v plazmě, která se tvoří v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového materiálu a následném uložení na tomto povrchu. Tato metoda je podrobně rozebrána v publikacích [3,19,21,35].

4.1 Princip a rozdělení fyzikální metody PVD

Povlaky se vytvářejí kondenzací částic (atomů) za sníženého tlaku ($0,1-1\text{Pa}$), které jsou uvolňovány ze zdroje částic (targetů) fyzikálními metodami (naprašováním nebo odpařováním). Uvolněné částice jsou ionizovány a reagují s atmosférou komory, kterou tvoří inertní a neinertní plyn (ve většině případů Ar a N_2), dále jsou záporným předpětím urychlovány k povrchu substrátu, na kterém se usazují ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku [3].



Obr. 4.1 Schéma vzniku PVD povlaku [3].

Vrstva povlaku je vytvářena z jednotlivých dopadajících atomů (obr. 4.1). Atomy jsou na povrchu nejdříve zachyceny procesy sorpce, pohybují se po povrchu a dále jsou zachyceny trvalou vazbou nebo jsou zpětně uvolněny. Další dopadající atomy se pomocí pohyblivosti po povrchu mohou spojit vazbou s již dříve zachycenými atomy a postupně tak vytvářejí izolované zárodky (jádra) a ostrůvky rostoucí vrstvy, které se spojují, až dojde k vytvoření souvislé vrstvy homogenního povlaku [3].

Mezi hlavní nevýhody všech PVD metod patří složitý vakuový systém a umístění nástrojů do tzv. rotačních držáků. Použití rotačních držáků, které jsou umístěny v povlakovací komoře, je nezbytné z toho důvodu, aby bylo dosaženo rovnoměrného ukládání nanášeného povlaku po celém povrchu nástroje. Hlavní výhodou všech PVD metod (oproti metodě CVD) je dokonalé napovlakování ostrých hran [3].

Na nástroje z HSS ocelí [3,4] se PVD povlaky nanášejí na základě několika metod:

- naprašováním,
- napařováním,
- iontovou implantací.

*Poznámka: Pro nanášení PVD povlaků na nástroje vyrobené z HSS ocelí se nejčastěji používají dvě základní operace: **magnetron sputtering** (magnetronové naprašování) a **cathodic arc evaporation** (obloukové odpařování) [18,24].*

4.1.1 Naprašování

Naprašování je jedna z nejjednodušších metod nanesení PVD povlaku na řezný nástroj [21]. Probíhá ve vakuu nebo při nízkém tlaku ($<0,7$ Pa), kde se odprášené částice dostanou na povrch substrátu bez kolize s molekulami plynu, v prostoru mezi zdrojem (targetem) a substrátem. Pomocí této metody lze vytvářet tenké povlaky z těžkovitelných materiálů bez požadavku ohřevu targetů na vysokou teplotu, která je potřebná při odpařovacích procesech [3].

Naprašovací zařízení se skládá z katody (targetu), která je vyrobená z materiálu, který má být nanesen (naprášen), držáku substrátu, odprašovacího plynu, vakuové komory, čerpacího systému a zdroje energie. Doutnavý výboj vytvořený elektrickým polem hoří ve velmi zředěném inertním plynu (Ar) ve vakuové komoře (10^{-2} až 10^{-5}) Pa, která plní funkci anody. Nad záporně nabitým targetem se pomocí výboje udržuje argonová plazma, jejíž kladné ionty jsou elektrickým polem urychleny na target a při dopadu z jeho povrchu v důsledku pohybové energie odprašují jednotlivé atomy nebo molekuly [3].

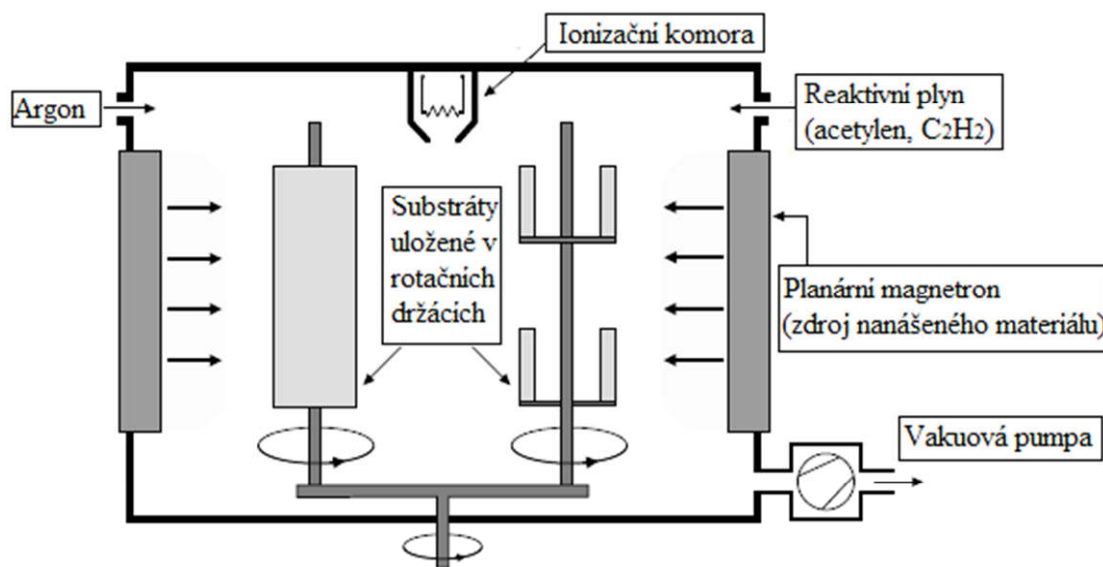
Rozdělení [3] naprašovacích metod:

- naprašování doutnavým výbojem,
- magnetronové naprašování,
- radiofrekvenční naprašování,
- naprašování iontovým paprskem.

Nejjednodušším naprašovacím systémem je naprašování doutnavým výbojem, které je díky snadnosti výroby targetů z různých materiálů často používané, ale rychlost depozice je velmi pomalá. Radiofrekvenční naprašování umožňuje depozici povlaků z nevodivých terčů. Naprašování iontovým paprskem zajišťuje vynikající adhezi povlaku k substrátu a vysokou čistotu nanášeného povlaku. Účinnost ionizace poblíž

targetu lze u diodového naprašovacího procesu podstatně zvýšit využitím magnetického pole. U běžné rovinné diody jsou ionty generovány relativně daleko od targetu a nastává vysoká pravděpodobnost, že ztratí svoji energii vůči stěnám komory. Magnetronové naprašování (obr. 4.2) zajišťuje v důsledku vysoké účinnosti ionizačního mechanismu, který je provozován při tlacích okolo 10^{-1} Pa s vysokou proudovou hustotou a při nízkém napětí, vysokou intenzitu naprašování [3,15,18,20,21].

Z tohoto důvodu je nejpoužívanějším systémem **magnetronové naprašování** (magnetron sputtering) [3].



Obr. 4.2 Schéma magnetronového naprašování [22].

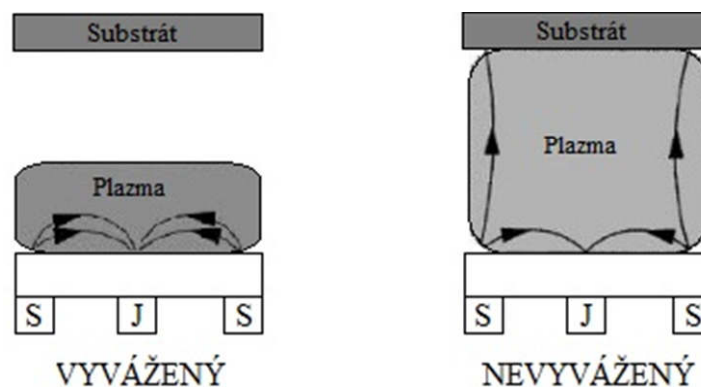
Existují dvě základní konfigurace magnetronového naprašování, s válcovým a rovinným magnetronem. Magnety magnetronů jsou umístěny podél vnějšího okraje a uprostřed katody. Pokud je síla vnitřních a vnějších magnetů přibližně stejná, jedná se o vyvážený magnetron (obr. 4.3), kde většina siločar vytváří smyčku mezi vnitřními a vnějšími magnety. Pokud je jeden z magnetů silnější než druhý, jedná se o nevyvážený magnetron. Více o metodě magnetron sputtering lze nalézt v odborných publikacích [3,15,22-27].

Výhody [24] naprašování:

- target je stabilním zdrojem par a má vysokou životnost,
- velmi nízké zatížení tepelnou radiací,
- target a substrát mohou být umístěny blízko sebe,
- variabilní uspořádání a tvar targetů,
- lze naprašovat a ukládat prvky, slitiny a chemické sloučeniny.

Nevýhody [24] napařování:

- velké vnitřní napětí v povlaku,
- targety jsou drahé,
- špatné využití materiálu,
- intenzita napařování je ve srovnání intenzity napařování nízká,
- většina energie dopadající na target se mění v teplo, které je nutno odvádět,
- v mnoha uspořádáních je depozice nerovnoměrná a proto je nutné substrát upevnit do rotačního držáku.



Obr. 4.3 Schéma magnetického pole vyváženého a nevyváženého magnetronu [23].

4.1.2 Napařování

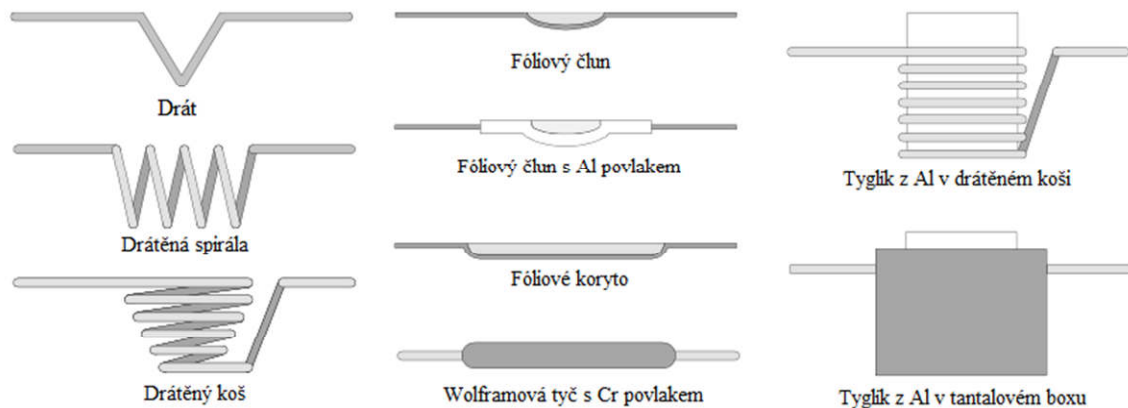
Napařování probíhá ve vakuu, při tlaku (10^{-3} až 10^{-8})Pa, při tomto tlaku je střední volná dráha v porovnání se vzdáleností target-substrát velmi velká (10^2 až 10^7)cm. Odpařené atomy se před kondenzací na substrátu pohybují po nekolizních drahách a dochází k vytvoření povlaku s nerovnoměrnou tloušťkou (největší nad targetem). Do komory je přiváděn odpovídající plyn (většinou Ar), aby došlo ke zmenšení střední volné dráhy. Plyn je přiváděn pod tlakem (0,7 až 26,7)Pa, takže odpařené složky při transportu na substrát prodělají vícenásobné srážky a výsledkem je povlak s rovnoměrnou tloušťkou [3].

Rozdělení [3] napařovacích metod:

- odporové odpařování,
- odpařování elektronovým paprskem,
- odpařování pomocí elektrického oblouku,
- laserem indukované odpařování.

Odpařovací zdroje jsou klasifikovány podle způsobu ohřevu pro přeměnu z tuhého nebo kapalného stavu do plynné fáze. Nejjednoduššími odporovými zdroji jsou vyhřívané kovové dráty a fólie (obr. 4.4), které jsou dostupné v různých velikostech

a tvarech. Obvykle jsou vyráběny z kovů, které mají vysokou teplotu tavení (např. W a Mo) a nízký tlak par, což znamená, že nekontaminují vytvářený povlak [3].



Obr. 4.4 Odporově vyhřívané odpařovací terče [25].

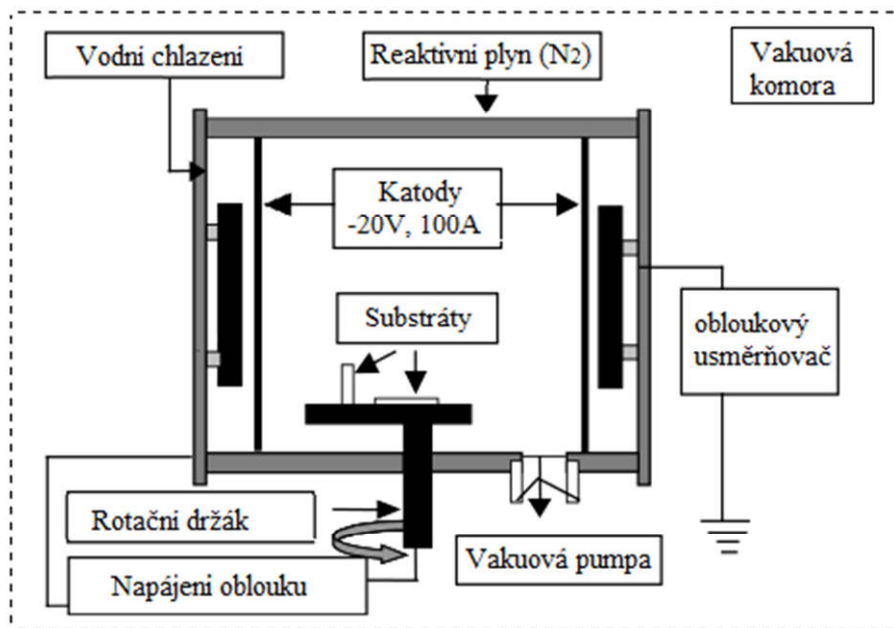
Nejpoužívanějším systémem je **obloukové napařování** (cathodic arc evaporation - CAE). Nanášený materiál je odpařován pomocí nízkonapěťového elektrického oblouku (obr. 4.5) za specifických podmínek hoření oblouku za nízkého tlaku. Na anodě (vakuová komora) hoří oblouk po celé její ploše, na katodě (targetu) hoří pouze bodově, v místě o průměru asi $20\mu\text{m}$. Tato katodová skvrna se po povrchu terče pohybuje náhodně, rychlostí přibližně $50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z důvodu vysoké teploty v místě katodové skvrny (10000 až 20000) $^{\circ}\text{C}$ zajišťuje odpaření prakticky jakéhokoliv elektricky vodivého materiálu. Pohyb katodové skvrny lze řídit magnetickým polem a zajistit tak řízené odpařování požadovaného materiálu [3]. Více o této metodě lze nalézt v odborných publikacích [26-31].

Výhody [24] obloukového odpařování:

- nízké zatížení tepelnou radiací,
- možnost odpařit všechny elektricky vodivé materiály,
- variabilní uspořádání katody,
- plazmový oblouk efektivně ionizuje odpařovaný materiál i reaktivní plyny,
- menší znečištění terče než u napařovacích metod,
- před depozicí mohou být ionty materiálu povlaku urychlovány na vysokou energii,
- reaktivní plyny jsou aktivovány plazmou, která zlepšuje procesy depozice.

Nevýhody [24] obloukového odpařování:

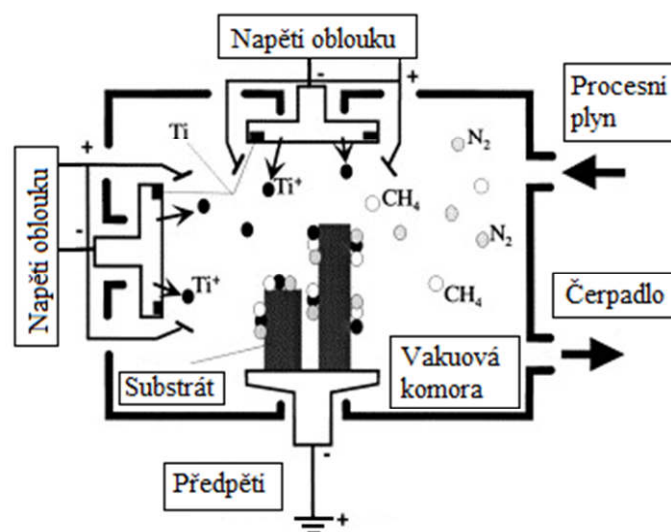
- vysoké zatížení tepelnou radiací,
- odpařovaný materiál musí být elektricky vodivý,
- roztavené makročástice vyvržené z katody se mohou dostat do povlaku a vytvořit na jeho povrchu kuličky.



Obr. 4.5 Schéma nanášení povlaku pomocí obloukového napařování [26].

4.1.3 Iontová implantace

Iontová implantace je kombinací napařování a napařování [32]. Jedná se o hybridní proces, u kterého je povrch substrátu bombardován svazkem částic s vysokou energií (obr. 4.6). Protože je mezi substrátem (katodou, záporný potenciál 50 až 1000 V) a odpařovačem vytvořeno silné elektrické pole (až 1000 V), dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře, který ionizuje částice plynu i odpařené částice čistého kovu. Reakcí iontů vzniká povlak, který se usazuje na povrchu předmětů vsázky [3].



Obr. 4.6 Schéma nanášení povlaku iontovou implantací [33].

4.2 Příprava HSS nástrojů před povlakováním

Než dojde k samotnému nanášení povlaků na HSS nástroje, je potřeba je před samotným povlakováním očistit a upravit. Kvalita břitů a broušených ploch nástroje je z hlediska povlakování velmi důležitým parametrem, který ovlivňuje adhezi mezi podkladem a nanášeným povlakem. Pokud se na nástroji vyskytují po broušení výrazné stopy, dochází v těchto místech k odlupování povlaku. Odlupování povlaku můžeme eliminovat mechanickou úpravou břitů a funkčních povrchů nástroje. U HSS nástrojů jsou tyto nerovnosti odstraněny ručním odjehlením nebo kartáčováním. Velmi důležitým parametrem, který ovlivňuje adhezi povlaku k podkladu, je vhodný výběr brusiva a jeho nosného kotouče [34].

Dalším důležitým krokem před samotnou depozicí povlaku je odmaštění, které zajistí odstranění konzervačních a mastných látek z povrchu nástroje. Odmašťovací prostředky jsou na bázi ropných derivátů a samotný proces probíhá v jednoduchých odmašťovacích zařízeních, podle kapacitních potřeb nebo velikosti povlakovaných nástrojů [34].

Mokrý čištění se provádí za pomoci kombinovaných metod s využitím oplachů, ultrazvuku, elektrochemických metod, vakuového sušení nebo odpaření těkavých kapalin. Samotný proces probíhá na mycích linkách (obr. 4.7), které jsou tvořeny několika samostatnými mycími a oplachovými vanami. Nejpoužívanějším čisticím pracovním médiem je roztok NaOH. Pro zvýšení odmašťovacího účinku mohou roztoky obsahovat malé množství tenzidů (smáčedel) nebo kyseliny citrónové. Po čištění následují oplachy, které mají za úkol odstranit zbytky čisticích prostředků a chránit očištěný povrch proti korozi. Pro zajištění kvalitního povrchu, bez zbytkových map, je třeba povrch rychle osušit (odpaření na vzduchu nebo ve vakuu) [34].

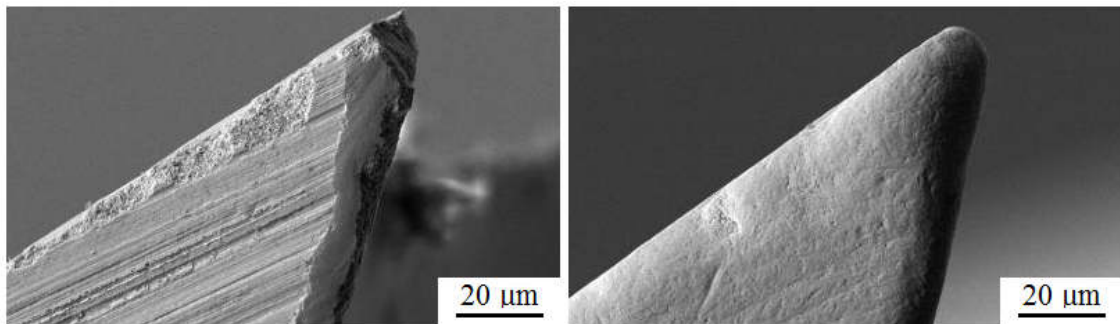


Obr. 4.7 Mycí linka Finnsonic [36].

Pískování je metoda, kterou se odstraňují pevně ulpívající nečistoty na povrchu nástrojů. Jako vhodné pískovací médium se používá SiC nebo Al_2O_3 se zrnitostí (20 až 100) μm [34].

Adhezi povlaku na funkčních plochách nástroje lze zlepšit pomocí metody omílání v granulátech (obr. 4.8). Jedná se o mechanickou úpravu, při které se součást (nástroj) vynuceně pohybuje v nádobě naplněné granulátem. Omíláním se zmenší nerovnosti po předchozí operaci broušení, které byly způsobeny nevhodně zvolenou technologií (materiál brousícího kotouče, zrnitost kotouče, řezné podmínky, atd.) [34].

Stripping je metoda, která se používá pro odstraňování starých povlaků, především z HSS nástrojů. Je prováděna chemickou a elektrochemickou metodou, kdy využívá silná oxidační činidla. Nejčastěji se používá roztok peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu, ohřátý přibližně na 70°C. Po odstranění starého povlaku je nutné nástroje opláchnout. Při strippingu dochází k narušení struktury povrchu odleptáním kobaltu, což je zvláště nebezpečné u nástrojů ze SK, ale také u nástrojů vyrobených z HSS Co5 nebo HSS Co8 ocelí (5% a 8% obsah kobaltu). Je možné odstraňovat jak povlaky na bázi Ti (např. TiN, Ti(C,N), (Al,Ti)N), ale i vrstvy obsahující Cr (např. CrN, (Cr,Al)N, (Cr,Al,Si)N) [34, 37].



Obr. 4.8 Detail břitu nástroje před a po omílání v granulátech [38].

4.3 Vlastnosti povlaků a typy jednotlivých nanášených vrstev

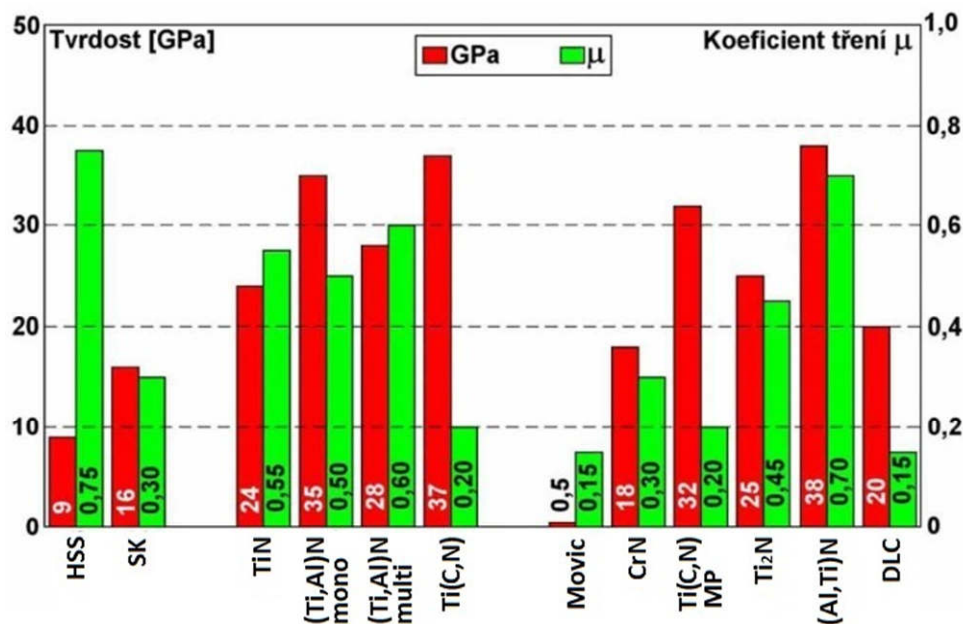
Mezi hlavní faktory, které ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti nástrojů vyrobených z rychlořezných ocelí patří zvolená metoda povlakování, druh nanášeného povlaku a jeho tloušťka [32]. Protože je při frézování břit nástroje vystaven velkým rázům (vícebřitý nástroj - přerušovaný řez) dochází u tlustých povlaků k mikrovydrolování částic. Právě z tohoto důvodu se pro frézovací operace doporučují tenčí PVD povlaky [5].

Mezi největší dodavatele PVD povlaků na území ČR patří společnosti Liss a.s. [41] (Rožnov pod Radhoštěm) a SHM s.r.o. [42] (Šumperk).

Mezi základní vlastnosti [3,39] PVD povlaků patří:

- **otěruvzdornost** - vlastnost prodlužující životnost řezného nástroje,
- **tepelná odolnost** - schopnost povlaku odolávat vysokým teplotám (až 800°C) a zároveň vytvářet tepelnou bariéru. Tepelná odolnost je zejména důležitá u vysokorychlostního obrábění, kde je převážné množství tepla (až 78%) odváděno třískou.
- **adheze** - jedná se o přilnavost povlaku k podkladovému materiálu, měří se pomocí vpichování Rockwellova hrotu do povlakované části nástroje,
- **tloušťka** - měří se pomocí kalotestu (je založen na principu rotující ocelové kuličky, která na povrchu povlakovaného vzorku vybrousí kulový vrchlík, ve kterém lze jednoduše rozpoznat mezikruží reprezentující hodnocený povlak). Tloušťka nanášené vrstvy se u PVD povlaků pohybuje v rozmezí (1 až 7) µm,

- **korozivzdornost** - povlaky na bázi hliníku vykazují nejlepší korozivzdornost - např. (Ti,Al)N nebo (Al,Ti)N,
- **mikrotvrdost**- nejčastěji je měřena Vickersovou metodou.



Obr. 4.9 Porovnání tvrdosti a koeficientu tření různorodých povlaků [3].

Povlaky [40] jsou na nástroje z HSS ocelí nanášeny jako jednovrstvé (tzv. monovrstvy) nebo vícevrstvé (tzv. multivrstvy):

- **multivrstvé povlaky** - povlaky, které zpomalují šíření trhlin a poruch. Trhliny postupují po jednotlivých vrstvách, čímž zvyšují výslednou odolnost a prodlužují životnost nástroje. V případě multivrstev je možné nanášet povlaky větších tloušťek než v případě monovrstev.
- **gradientní vrstvy** - povlaky s průběžně proměnným složením vrstvy. Např. povlak (Ti,Al)N je složen tak, že směrem k povrchu vrstvy dochází ke zvýšení obsahu hliníku a to z toho důvodu, aby byla zabezpečena vysoká oxidační odolnost, ale zároveň zůstala zachována dostatečná tvrdost, kterou zajišťuje titan.
- **nanovrstvé povlaky** - jedná se o multivrstvé povlaky s tloušťkou jednotlivých vrstev pohybující se pod hranicí 10nm. Pokud je rozhraní mezi jednotlivými vrstvami s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi dostatečně ostré, pak lze najít optimální periodu střídání jednotlivých vrstev, při které je tvrdost celého povlaku výrazně vyšší.
- **nanokompozitní vrstvy** - dnes reprezentují novou generaci velmi tvrdých PVD vrstev. Jedná se o povlaky, které se vyznačují vysokou tvrdostí, vysokou tepelnou stabilitou a odolností vůči oxidaci. Typickým představitelem nanokompozitních povlaků jsou vrstvy na bázi nc-(Ti_{1-x}Al_x)N/(a-Si₃N₄), které nabízí např. společnost Liss a.s. pod obchodním názvem nACo®. Zde představují krystalickou složku krystaly (Ti,Al)N a amorfní složku Si₃N₄ [43].

Tab. 4.1 Vybrané typy PVD povlaků nabízených společnostmi Liss a.s. [43].

Typ vrstvy	Barva	Tloušťka [μm]	Tvrдость [GPa]	Max. teplota použití [$^{\circ}\text{C}$]	Koeficient tření (proti oceli)
TiN	zlatá	1-7	24	600	0,55
(Ti,Al)N	černá	1-4	28	700	0,60
(Al,Ti)N	černá	1-4	33	850	0,70
Ti(C,N)	šedá	1-4	35	400	0,20
DLC	černá	0,5-4	25	400	0,15
CrN	kovově stříbrná	1-7	18	700	0,30
(Al,Ti,Cr)N	šedomodrá	1-4	34	900	0,55
nACo®	fialovočervená	1-4	45	1200	0,45
nACRo®	šedomodrá	1-4	40	1100	0,35

Použití a základní vlastnosti povlaků [43,44], nabízených společnostmi Liss a.s.:

- **TiN** - je základní povlak, nanášený na nástroje, které jsou používány pro nenáročné aplikace. Používá se pro obrábění nízkými reznými rychlostmi a pro obrábění uhlíkových ocelí s nízkou pevností.
- **Ti(C,N)** - povlak s vysokou odolností vůči abrazi při běžných teplotách s nízkým koeficientem tření. Používá se pro obrábění neželezných kovů a ocelí se středním obsahem uhlíku. Velice důležitým faktorem, při použití nástroje s povlakem Ti(C,N), je použití procesní kapaliny.
- **(Ti,Al)N** - jedná se o tzv. univerzální multivrstvý povlak pro obrábění různorodých materiálů středních a vyšších pevností středními a vyššími reznými rychlostmi. Vyznačuje se výborným poměrem tvrdosti a houževnatosti. Dále se vyznačuje vysokou oxidační odolností a tvrdostí za vysokých teplot, takže při použití nástroje s tímto povlakem není vyžadováno dokonalé chlazení.
- **(Al,Ti)N** - povlak je vhodný pro frézování vysokými reznými rychlostmi a pro obrábění materiálů o vyšších pevnostech a tvrdostech. Stejně jako povlak (Ti,Al)N se vyznačuje velmi vysokou oxidační odolností, takže při jeho použití není vyžadováno dokonalé chlazení.
- **(Al,Ti,Cr)N** - povlak používaný pro náročné operace. Jeho výhodou je vyšší teplotní odolnost (až 900°C), z toho důvodu je vhodný pro obrábění houževnatých materiálů bez použití procesní kapaliny, dále pro obrábění nerezových ocelí, titanu a jeho slitin.
- **nACo®** - nanokompozitní povlak (nc-AlTiN)/(a-Si₃N₄) s vysokou tvrdostí a extrémně vysokou tepelnou odolností. Používá se pro obrábění kalených ocelí, pro obrábění bez použití procesní kapaliny.
- **nACRo®** - nová generace nanokompozitního povlaku (nc-AlCrN)/(a-Si₃N₄) s vysokou tvrdostí a oxidační odolností. Je vhodný pro obrábění těžko obrobitelných materiálů.
- **DLC** - kluzná vrstva na bázi hliníku s vynikajícím koeficientem tření.

5 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

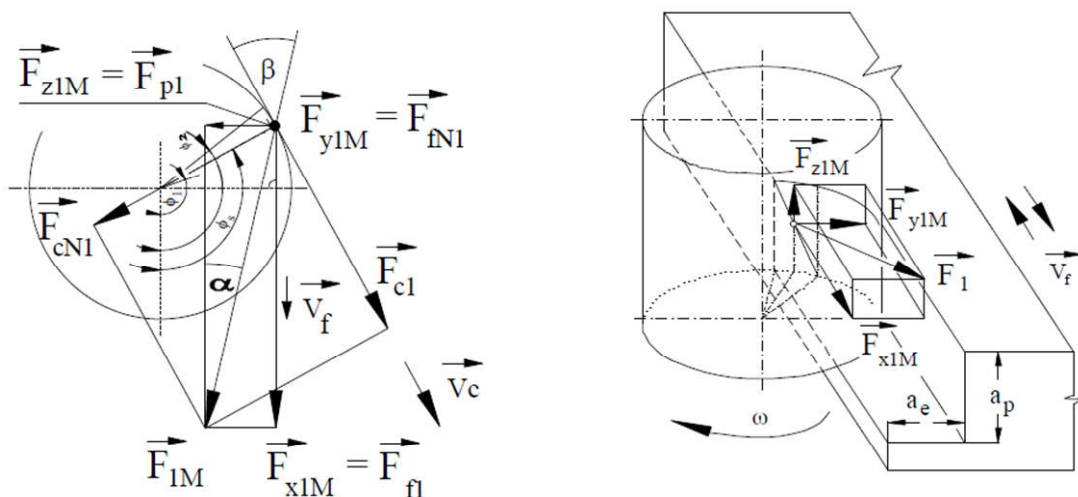
Technologie frézování patří k nejstarším a nejzákladnějším metodám obrábění, kdy materiál obrobku je ve formě třísky odebrán vícebřitým rotujícím nástrojem - frézou. Nástroj tedy vykonává hlavní pohyb, vedlejší posuvový pohyb je ve většině případů kolmý na osu nástroje a koná jej obrobek, který je upnutý na pracovním stole frézky. Samotný řezný proces je přerušovaný, každý zub odřezává krátké třísky proměnné tloušťky [7,15].

Frézování se nejčastěji používá pro výrobu rovinných a tvarových ploch. Podle toho, kde jsou na nástroji umístěny jednotlivé zuby, se frézování rozděluje na dva základní typy, frézování válcové (sousledné, nesousledné) a frézování čelní. Válcové frézování se používá pro obrábění válcových a tvarových ploch, kde zuby frézy jsou tvořeny pouze po obvodu nástroje a obráběná plocha je rovnoběžná s osou rotace nástroje. Válcové frézování se dále rozděluje na frézování sousledné a nesousledné. Čelní frézování se uplatňuje při práci s čelními frézami, kde zuby frézy jsou vytvořeny jak na obvodě, tak i na čelní ploše nástroje. Podle polohy osy frézy vzhledem k frézované ploše se čelní frézování rozděluje na symetrické a nesymetrické [7,8,15].

Mezi hlavní monitorované parametry při testování řezných nástrojů, v tomto případě čelních válcových stopkových HSS fréz, patří silové zatížení a opotřebení břitů, které je rozebráno v následujících podkapitolách.

5.1 Silové účinky při frézování

Při specifikaci řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu, který se nachází v poloze určené úhlem φ_i . Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková síla F působící na břitu rozkládá na složky F_c a F_{cN} , respektive na složky F_f a F_{fN} [8,15].



Obr. 5.1 Schéma zatížení řezného nástroje [8].

Výslednou řeznou sílu F_c lze spočítat na základě vztahů (5.1-5.7) [7].

Řezná síla F_{ci} se vyjádří na základě měrné řezné síly k_{ci} a jmenovitého průřezu třísky A_{Di} :

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (5.1)$$

Měrná řezná síla k_{ci} se vypočte na základě vztahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (5.2)$$

Po dosazení vztahu (5.2) do vztahu (5.1) dostaneme rovnici pro výpočet řezné síly F_{ci} pro válcové frézování:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \quad (5.3)$$

Při čelním frézování se řezná síla F_{ci} vyjádří obdobným způsobem na základě měrné řezné síly k_{ci} a průřezu třísky A_{Di} :

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (5.4)$$

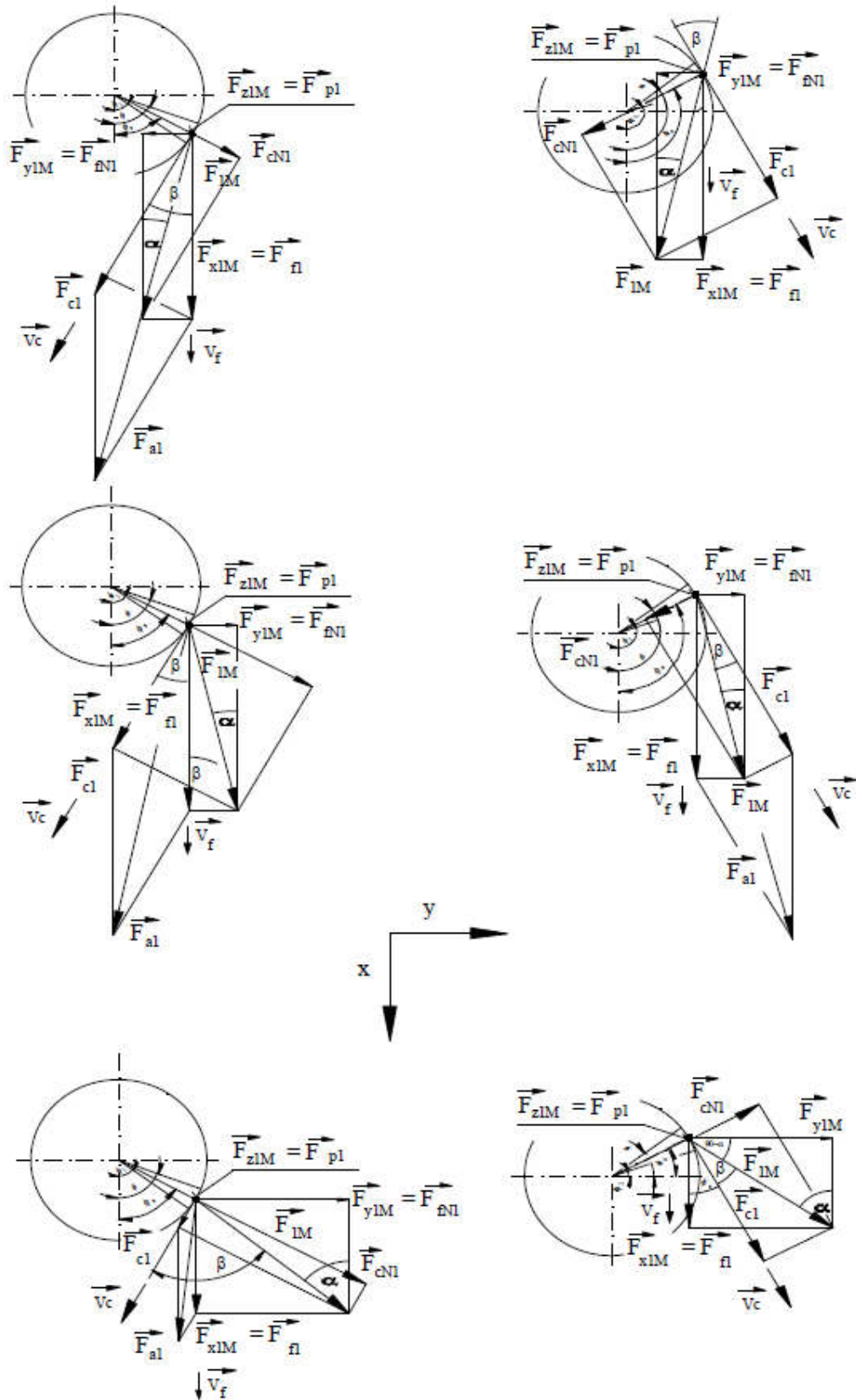
Po dosazení vztahu (5.4) do vztahu (5.1) dostaneme rovnici pro výpočet řezné síly F_{ci} pro čelní frézování:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sin^{(x)} \varphi_i \quad (5.5)$$

Při frézování je v záběru několik zubů současně, protože nástroje jsou ve většině případů konstruovány jako vícebřité. Výsledná řezná síla proto závisí na okamžité poloze zubů frézy vzhledem k obrobku. Výsledná řezná síla F_c se vypočítá na základě vztahu (5.6) pro válcové frézování a podle vztahu (5.7) pro frézování čelní [7].

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad (5.6)$$

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad (5.7)$$



Obr. 5.2 Silový rozklad v průběhu opotřeбенí pro frézování: a) nesousledné; b) sousledné [16].

V průběhu frézování se silové účinky mění v závislosti na stavu opotřebení nástroje (nastává změna geometrie nástroje). Nejčastěji je tato změna patrná u nástrojů s břity ve šroubovici, kdy na počátku obrábění je nástroj v důsledku pozitivních úhlů čela vtahován do řezu. Na konci frézování se od obrobeného povrchu odtláčuje, důvodem je značné opotřebení řezného nástroje (obr. 5.2) [8].

Měření řezných sil je možné realizovat pomocí dvou metod, **přímé a nepřímé metody**. Nepřímá metoda vychází z měření rozdílu příkonu a výkonu stroje. Při měření je použita měřicí aparatura nebo ampérmetr. Touto metodou je z odečtených hodnot vypočtena hodnota celkové síly. Nevýhodou ovšem je, že není možné zjistit směr jejího působení. Přímá metoda je realizována piezoelektrickými dynamometry nebo pomocí tenzometrů. U této metody není měřena síla, kterou vyvolal proces řezání, ale reakční odezva obrobku, která je dále transformována na síly působící na nástroj [17].

Měření časových závislostí rozvoje sil při frézování pomocí piezoelektrických dynamometrů lze nepřímo kvantifikovat i průběh opotřebení. Tyto analýzy jsou časově i finančně náročné, ale na základě získaných výsledků je možné zhodnotit úspěšnost návrhu geometrie frézovacího nástroje, naneseného PVD povlaku nebo zvolené procesní kapaliny na řezný proces [8].

6 OPOTŘEBENÍ BŘITU ŘEZNÉHO NÁSTROJE

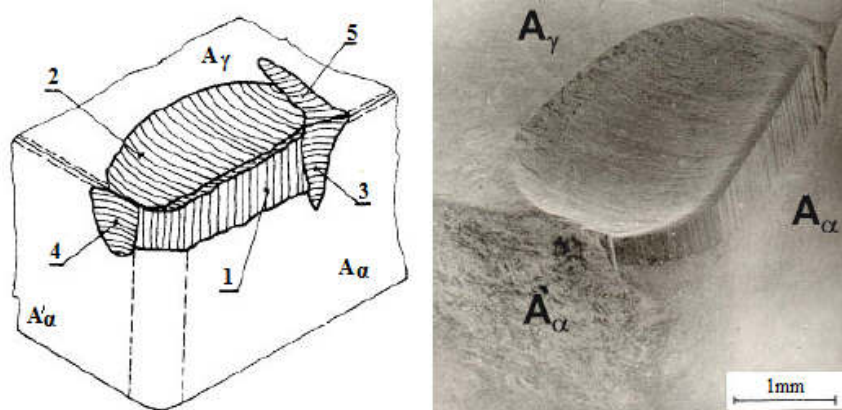
Opotřebení řezného nástroje vzniká při vzájemném kontaktu s obráběným materiálem. Celý proces opotřebení je velmi složitý děj, který závisí na několika faktorech (druh obráběného a řezného materiálu, druh operace, řezné prostředí, geometrie nástroje, atd.), v jehož průběhu působí několik odlišných fyzikálně-chemických jevů, tzv. mechanismů opotřebení [15,45].

Mezi základní mechanismy [15,45] opotřebení patří:

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

Abrazi způsobuje brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu a částic uvolněných z nástroje. **Adheze** znamená vznikání a následné okamžité porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela nástroje a třísky v důsledku vysokých tlaků a teplot. **Difuze** označuje migraci atomů z obráběného materiálu na nástroj a naopak (vznik nežádoucích chemických sloučenin). K **oxidaci** dochází v důsledku vzniku chemických sloučenin na povrchu nástroje (přítomnost kyslíku v okolním prostředí). **Plastická deformace** je důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení nástroje kumulovaného v čase. **Křehký lom** je důsledek vysokého mechanického zatížení nástroje, který vzniká např. při frézování (přerušovaný řez) [15,45].

Na obr. 6.1 jsou zobrazeny jednotlivé formy opotřebení, které mohou na nástroji nastat po provedených řezných zkouškách.

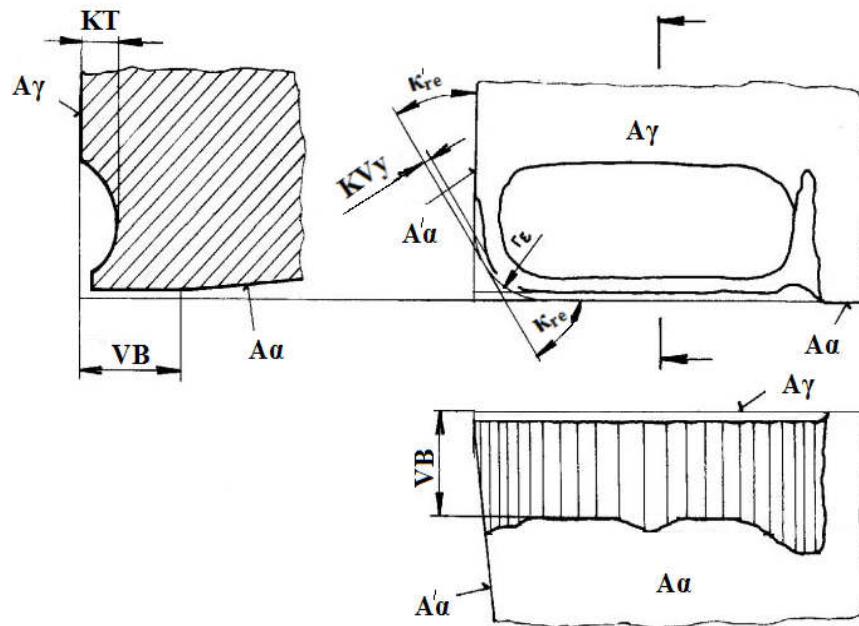


Obr. 6.1 Formy opotřebení řezného nástroje:

- 1- fazetka opotřebení na hřbetě; 2- výmol na čele; 3- primární hřbetní rýha;
4- rýha na čele; 5- sekundární hřbetní rýha [45].

Pro měření opotřebení se používají **metody přímé a nepřímé**. Mezi přímé metody patří např. měření vybraného kritéria (VB, KT, KV_y), vážení břitové destičky nebo elektrické metody. Mezi nepřímé metody patří např. měření a vyhodnocování jednotlivých složek řezné síly, měření teplot řezání, měření kmitání soustavy s-n-o nebo vyhodnocování elektrického příkonu obráběcího stroje [15,45].

Nejpoužívanější přímou metodou pro hodnocení opotřebení jsou tzv. **kritéria opotřebení** (obr. 6.2). Nejpoužívanějším kritériem opotřebení je kritérium **VB**- šířka fazetky na hřbetě. Další často používaná kritéria pro měření opotřebení jsou kritéria **KT** - hloubka výmolu na čele a **KV_y** - radiální opotřebení špičky nástroje [45].



Obr. 6.2 Kritéria opotřebení řezného nástroje [45].

Před samotným testováním řezných nástrojů je potřeba stanovit maximální hodnotu opotřebení **VB_{max}**, která představuje maximální hodnotu šířky fazetky na hřbetě nástroje, po překročení této hodnoty je nástroj považován za opotřeбенý. Hodnoty měřeného kritéria VB se měří na všech břitech nástroje v celém průběhu testování. Je důležité nastavit vhodný krok, po kterém jsou hodnoty měřeny a stanovený krok dodržovat po celou dobu testování nástroje. Hodnoty kritéria VB se nejčastěji měří pomocí dílenského mikroskopu.



Obr. 6.3 Ukázka měření opotřebení pomocí kritéria VB – šířky fazetky na hřbetě.

7 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE Z RYCHLOŘEZNÝCH OCELÍ

Tato kapitola je zaměřena na rozbor nástrojů vyrobených z rychlořezných ocelí a na jednotlivé výrobce řezných nástrojů, se zaměřením na společnost ZPS – Frézovací nástroje a.s. se sídlem ve Zlíně. Nosnou částí této kapitoly je návrh technologie výroby nového řezného nástroje pro hrubovací operace (stopkové válcové čelní frézy) a následná konstrukce prototypu nástroje v programu Autodesk Inventor.

7.1 Klasifikace rychlořezných frézovacích nástrojů

Po zavedení slinutých karbidů na začátku 20. století do technické praxe se predikovalo, že nástroje vyrobené z rychlořezných ocelí budou postupem času vytlačeny a nahrazeny právě nástroji ze slinutých karbidů (SK). Zkušenosti z praxe ukázaly, že nástroje ze SK nemohou nahradit relativně houževnatější HSS nástroje v mnoha případech. Zejména při obrábění za nízkých řezných rychlostí, na méně stabilních strojích nebo při obrábění přesných tvarových ploch. Na výslednou jakost HSS nástrojů má vliv především chemické složení, vhodně zvolený hutní proces, následné tepelné zpracování a dnes především vhodně zvolený PVD povlak. Povlaky na HSS nástrojích výrazně prodlužují trvanlivost nástroje a zlepšují mechanické vlastnosti. Dalším důležitým milníkem ve výrobě HSS nástrojů bylo zavedení práškové metalurgie. Oceli vyrobené touto technologií se vyznačují vyšší houževnatostí než oceli tvářené, mají také lepší odolnost proti opotřebení. Z těchto důvodů si nástroje vyrobené z HSS ocelí drží významné postavení na trhu řezných nástrojů i dnes, používají se ve velkém měřítku při obrábění nízkolegovaných ocelí, dřeva, plastů a nekovových materiálů a jejich slitin [7,8,15].

V současné době je na trhu nepřeberné množství frézovacích nástrojů, které jsou konstruovány jako celistvé nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD). Nástroje osazené VBD jsou nejčastěji vyrobené ze SK (dále řezná keramika, cermety), které jsou upnuty do nástrojových držáků (frézovacích hlav). Celistvé nástroje jsou vyráběny z HSS nebo ze SK (monolitní nástroje vyrobené pomocí práškové metalurgie).

Většina frézovacích nástrojů je standardizovaných, nástroje mají přesně stanovený počet zubů, směr rotace, stanovený úhel šroubovice (pokud se nejedná o nástroje s příkými zuby), přesně definovanou geometrii břitu, průměr nástroje, délku řezné části, délku řezné části s potřebným výběhem brousicího kotouče a celkovou délku nástroje.

Rychlořezné frézy se obecně rozdělují na nástrčné a stopkové. Nástrčné frézy se upínají do frézovacích trnů, stopkové frézy se nejčastěji upínají pomocí redukčních pouzder přímo do vřeten stroje nebo pomocí upínačů.

Poznámka: Pro porovnání rychlořezných frézovacích nástrojů na stávajícím trhu nástrojů byla zvolena stopková válcová čelní fréza, která je běžně dostupná ve dvou provedeních, krátká a dlouhá. Nově navrhovaný nástroj bude také konstruován jako stopková válcová čelní fréza.

7.2 Výrobci frézovacích nástrojů vyrobených z HSS ocelí

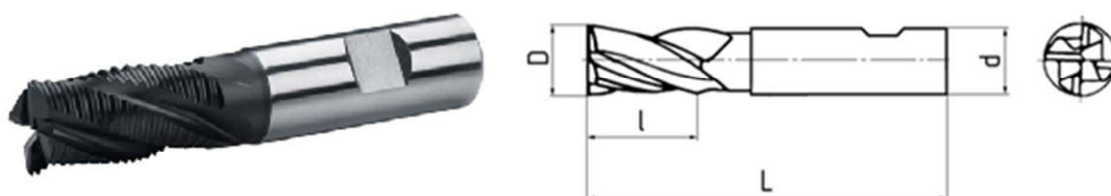
Mezi přední české i světové výrobce frézovacích nástrojů vyrobených z rychlořezných ocelí patří společnosti: ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE, FRAISA, EMUGE – FRANKEN, GÜHRING, ISCAR, CROMWELL a další.

Největším výrobcem rychlořezných fréz na území ČR je společnost **ZPS -Frézovací nástroje a.s.** [46] se sídlem ve Zlíně, která nabízí nástroje dle norem DIN a ČSN. Podle požadavků zákazníka na základě výkresové dokumentace nebo vytavitelného voskového modelu nástroje je společnost schopna vyrábět i speciální nástroje. Frézy jsou vyráběny z ocelí, které jsou uvedeny v tab. 7.1.

Tab. 7.1 Používané HSS oceli společnosti ZPS – Frézovací nástroje [47].

Označení	HSS	HSSE	HSSCo5	HSS Co8	HSS-PM
ČSN	19 830	PN 422993	19 852	-	-
DIN	1.3343	-	1.3243	1.3247	
C [%]	0,9	1,15	0,92	1,1	1,28
Cr [%]	4,1	4,1	4,1	3,9	4,2
Mo [%]	5,0	3,1	5,0	9,2	5,0
V [%]	1,8	3,1	1,9	1,2	3,1
W [%]	6,4	6,5	6,4	1,4	6,4
Co [%]	-	-	4,8	7,8	8,5
Tvrdość [HRC]	62-65	63-67	63-67	63-68	64-67

Pod označením **HSS** se skrývá rychlořezná ocel středního výkonu, která, jak uvádí výrobce je vhodná pro frézování materiálů do pevnosti 900 MPa. **HSSE** značí vysoce výkonnou litou ocel s dobrou houževnatostí, která je vhodná především pro nástroje větších průměrů a kotoučové frézy. Pod označením **HSS Co5** se nalézá vysoce výkonná ocel s dobrou houževnatostí s příměsí kobaltu (cca 5%), která se používá pro frézování materiálů do pevnosti 1200 MPa. **HSS Co8** značí vysoce výkonnou ocel s příměsí kobaltu (cca 8%) s dobrou houževnatostí a výbornou teplotní odolností. Tento materiál je vhodný především pro frézování vysoce pevných materiálů. Označení **HSSE-PM** označuje vysoce výkonnou ocel, vyrobenou pomocí práškové metalurgie. Tento materiál má homogenní strukturu a vyznačuje se vyšší rozměrovou stálostí a trvanlivostí ostří. Je vhodná pro obrábění vysoce pevných a těžko obrobitelných materiálů, jako jsou např. titan a jeho slitiny [47].



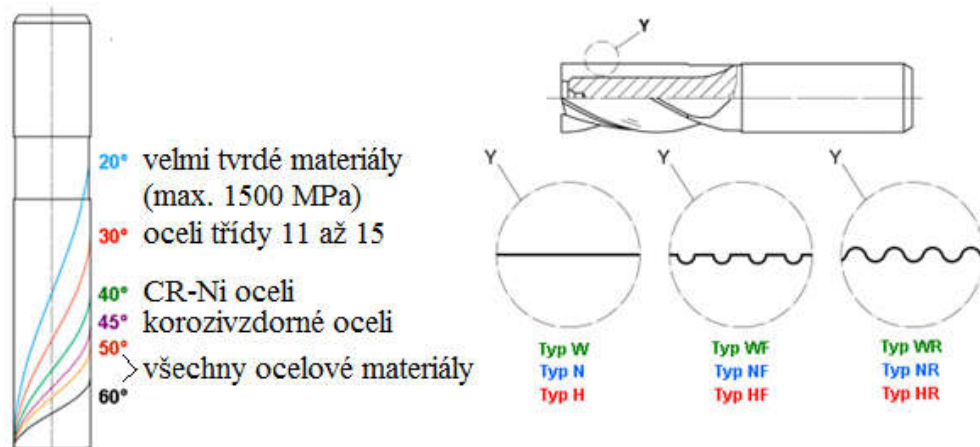
Obr. 7.1 Hrubovací válcová čelní stopková fréza společnosti ZPS-Frézovací nástroje, materiál HSSE-PM s povlakem (Ti,Al)N, 1 zub ostřen přes střed [48].

Společnost ZPS je v úzkém kontaktu se společností Liss a.s. [41] se sídlem v Rožnově pod Radhoštěm, která je jedním z předních výrobců PVD povlaků

na území ČR. Po konzultaci s dodavatelem povlaků byl jako „univerzální“ povlak pro většinu aplikací zvolen povlak (Ti,Al)N. Podle potřeb zákazníka je možné nástroj nechat deponovat i jinými povlaky (TiN, Ti(C,N), (Al,Ti)N, CrN, (Al,Ti,Cr)N nebo novou generací nanokompozitního povlaku nACo®).

Další společnosti zabývající se výrobou rychlořezných fréz na území ČR jsou společnosti **Monometal nástroje s.r.o.** [49], **Carbide s.r.o.** [50] a **Kalenast s.r.o.** [51]. Tyto uvedené firmy se zabývají především zakázkovou výrobou speciálních nástrojů, kdy na základě 3D modelu a výkresu je zhotoven nový nástroj metodou broušením na kulato do plného materiálu. Firmy spolupracují s předními dodavateli PVD povlaků na území ČR.

Společnost **Emuge – Franken servisní centrum s.r.o.** [52] je součástí celosvětové sítě reprezentantů německých společností Emuge-Werk Richard Glimpel a Franken, které patří mezi absolutní špičku v produkci vysoce kvalitních řezných nástrojů. Společnost se zabývá výrobou normovaných fréz vyrobených jak z HSS ocelí, tak ze SK, tak i výrobou speciálních nástrojů podle požadavků zákazníka.



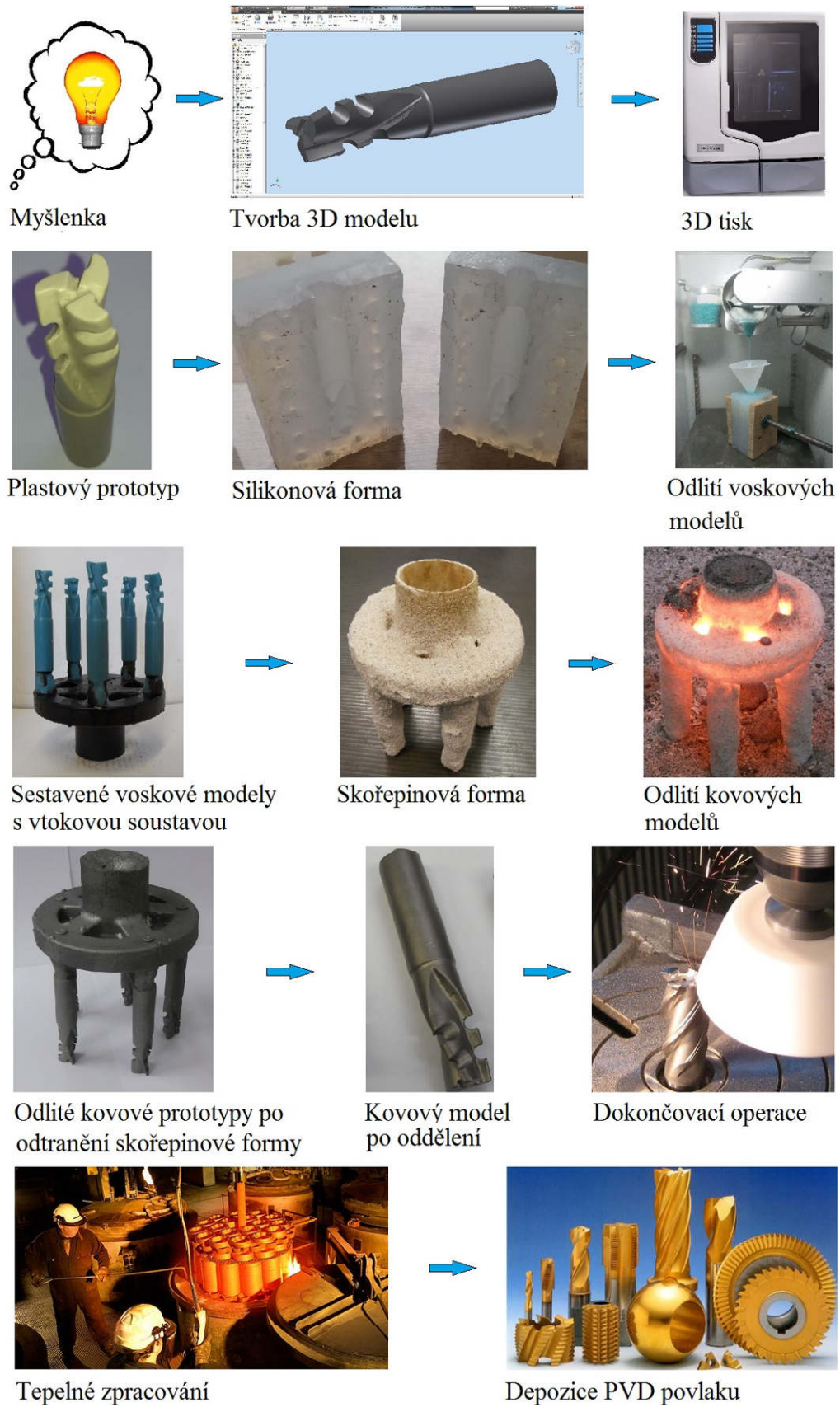
Obr. 7.2 Úhly stoupání šroubovice a typy geometrií HSS fréz společnosti Franken [53].

Další zastoupení frézovacích nástrojů vyrobených z HSS ocelí lze nalézt v katalogích zahraničních společností **GÜHRING s.r.o.** [54], **Fraisa** [55], **Cromwell** [56].

***Poznámka:** Výše uvedené společnosti nabízejí pro velký úběr materiálu klasické stopkové válcové čelní frézy se zuby ve šroubovici s/bez lamačem třísek, které jsou namáhány na tah. Jedním z hlavních cílů této práce je potlačení tahové napjatosti v patě zubu. Nový nástroj je konstruován jako tříbřitá fréza opatřená tzv. kompenzačními břity.*

7.3 Navržení technologie výroby nového frézovacího nástroje

Frézy s přímými zuby jsou náchylné k rázům, které vznikají při najetí nástroje do záběru. Z tohoto důvodu, je převážná většina čelních válcových stopkových fréz konstruována se zuby ve šroubovici (různý úhel stoupání šroubovice).



Obr. 7.3 Navržená technologie výroby frézy s kompenzačními břity.

Konvenční nástroje s pozitivní geometrií jsou náchylné na osové tahové namáhání, které způsobuje, že nástroje jsou vytahovány z řezu, dochází ke chvění a podřezání povrchu. Nástroje s negativní geometrií jsou namáhány na tlak. Z těchto důvodů je patrné, že je složité nalézt optimální geometrii řezného nástroje.

Nový nástroj je konstruován jako tříbřitá čelní válcová stopková fréza opatřená tzv. kompenzačními břity. Cílem této konstrukce je potlačení tahové napjatosti v patě zubu. Nejedná se tedy pouze o drobnou technickou úpravu stávajících normovaných fréz, kterých je na trhu dostatek, ale o novou koncepci řezného nástroje, kterou lze považovat za původní.

Konstrukce nástroje byla provedena v programu Autodesk Inventor. Po provedení konstrukce 3D modelu frézy byl získaný model převeden do formátu stl., který je potřebný pro 3D tisk nástroje pomocí technologie Fused Deposition Modelling (FDM). Získaný model slouží pro samotnou vizualizaci a posouzení geometrie a rozměrů nástroje.

Na základě vytištěného plastového prototypu frézy byla vyrobena dvoudílná silikonová forma, která slouží pro zhotovení voskových modelů, které jsou potřebné pro získání skořepinové formy, jedná se tedy o metodu přesného lití. Po odlití kovových prototypů následovalo tepelné zpracování a přebroušení funkčních ploch nástrojů. Po provedeném tepelném zpracování byly nástroje deponovány PVD povlaky, jako nejvhodnější se jeví povlaky na bázi nitridu titanu a hliníku (např. (Al,Ti)N, (Ti,Al)N nebo (Al,Ti,Cr)N), aby bylo docíleno lepších mechanických vlastností a prodloužení trvanlivosti nástrojů.

7.4 Konstrukce frézovacího nástroje

Prvním krokem pro konstrukci 3D modelu nástroje bylo třeba stanovit, jakou metodou bude nástroj vyráběn. Nejvhodnější metody pro výrobu prototypů nástrojů jsou broušení na kulato a metody přesného lití s následným přebroušením funkčních ploch.

V případě broušení na kulato je třeba znát rozměry brousicích kotoučů pro vyřezání šroubovitě drážky. V případě složité šroubovitě drážky by bylo zapotřebí vyrobit nový tvarový brousicí kotouč, jehož tvar a rozměry by odpovídaly profilu řezané drážky. Výroba nástroje pomocí metody přesného lití není limitována žádnými rozměry brousicích kotoučů, na základě 3D modelu frézy je vyrobena forma, po odlití jsou pouze funkční části nástroje přebroušeny. **Pro konstrukci 3D modelu frézy můžeme postupovat na základě dvou metod.**

První metoda [57] se věnuje matematickému popisu drážky stopkové čelní frézy, jejíž rotací a posunem kolem a podél osy nástroje je vytvořena řezná část frézy se šroubovitou drážkou. Výbrus na čele nástroje byl získán na základě Booleovských operací. Výsledný model nástroje byl pomocí Metody konečných prvků (MKP) pevnostně analyzován. Velkou neznámou této metody je modelování výběhu brousicího kotouče z polotovaru, protože není znám dostatek informací o tom, jakým způsobem se má profil drážky začít zvedat od osy frézy [58]. Více o této metodě lze nalézt v odborné literatuře [63-66].

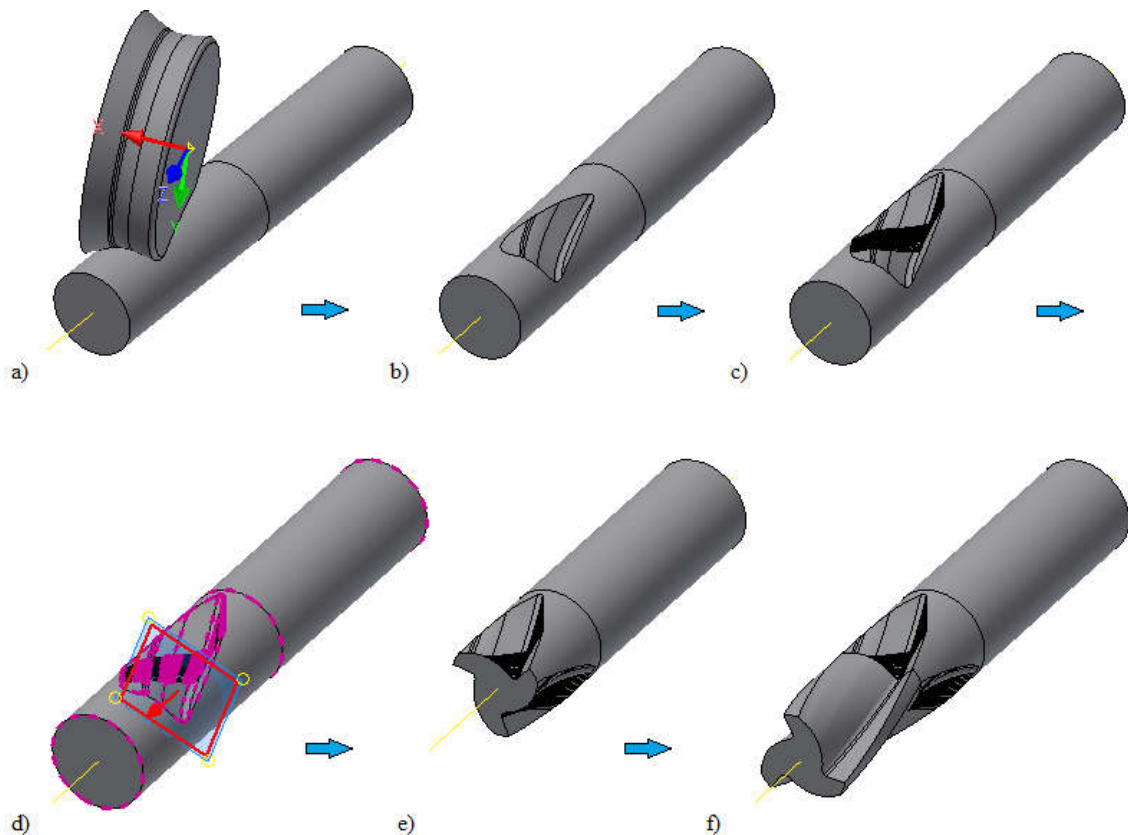
Druhá metoda [59] má opačný průběh. Pokud jsou známy rozměry brousicího kotouče a velikost polotovaru nástroje, parametry šroubovitě drážky a známe polohu kotouče vzhledem k polotovaru, můžeme na základě „simulace obrábění“ získat

příčný profil frézy, který slouží pro tvorbu 3D modelu. Principem je postupné odečítání modelu brousícího kotouče od modelu polotovaru. Model kotouče je v každém jednotlivém kroku posunut a natočen tak, aby jeho pohyb odpovídal pohybu po šroubovici frézy. Tímto způsobem vznikla drážka výběhu kotouče z frézy a část šroubovitě drážky nástroje. Požadovaná křivka příčného profilu nástroje se pak nachází v řezu kolmém na osu frézy [58]. Více o této metodě lze nalézt v odborné literatuře [67-71].

Pro konstrukci 3D modelu stopkové frézy byla zvolena metoda „simulace obrábění“. Těto metody bylo použito z toho důvodu, že je složité modelovat výběh brousícího kotouče.

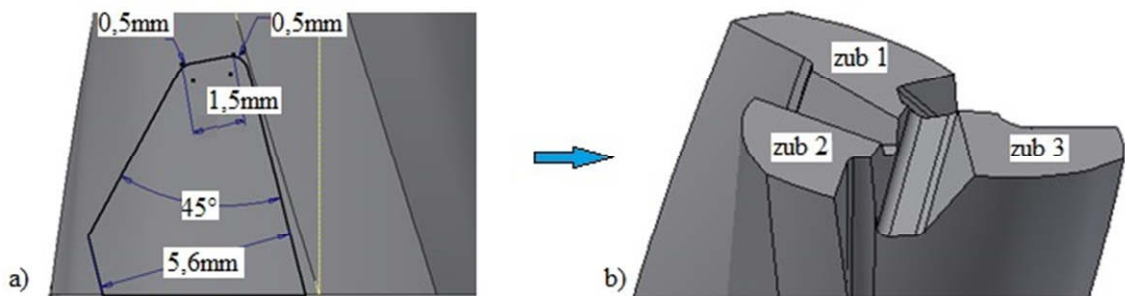
Prvním krokem bylo vytvoření polotovaru, do kterého byl pomocí vymodelovaného brousícího kotouče vytvořen první segment drážky, jejíž profil odpovídá budoucí šroubovitě drážce (obr. 7.4a, 7.4b). Dále byl vzniklý první segment (za pomoci 3D náčrtu) kopírován po spirálové křivce pomocí obdélníkového pole, výsledkem byla vzniklá **šroubovitá drážka i s potřebným výběhem brousícího kotouče** (obr. 7.4c). Dále byla součást rozdělena pomocí pracovní roviny (obr. 7.4d), aby bylo možné pomocí kruhového pole kopírovat stávající drážku i s výběhem o 120° , aby bylo dosaženo tříbřitého nástroje (obr. 7.4e).

Po rozdělení a následném rotování pomocí kruhového pole vznikl hladký profil (obr. 7.4f), který je potřebný pro vytvoření řezné části prototypu nástroje. Řezná část je vytvořena tažením vzniklého profilu po spirálové křivce. Vzniklé šroubovitě drážky jsou od sebe natočeny o úhel 120° .



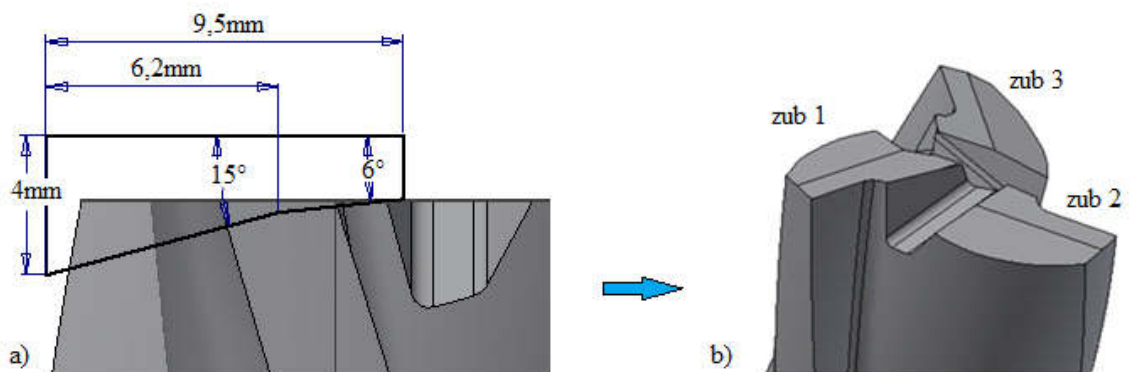
Obr. 7.4 Postup konstrukce šroubovitě drážky s potřebným výběhem brousícího kotouče.

Dalším krokem je **výbrus čelních a hřbetních ploch nástroje**. Pro konstrukci výbrusu čela byla opět zvolena „simulace obrábění“. Byl zvolen kotouč o šířce 5,6mm s jedním stranovým úhlem (45°) a radiusem hran 0,5mm (obr. 7.5a). Pro konstrukci první zubové mezery je náčrt umístěn do souřadného systému a je vysunut pod úhlem 22° , zub je ostřen přes střed. Pro konstrukci druhého i třetího zubu je uvažován stejný náčrt brousícího kotouče, ale mění se úhel vysunutí. Při pohybu kotouče by došlo ke kolizi se zubem ostřeným přes střed, z tohoto důvodu se mění úhel vysunutí brusného kotouče. Zvláště u konstrukce třetí zubové mezery je úhel vysunutí podstatně větší (36°). Vzniklé čelní plochy jsou zobrazeny na obr. 7.5b.



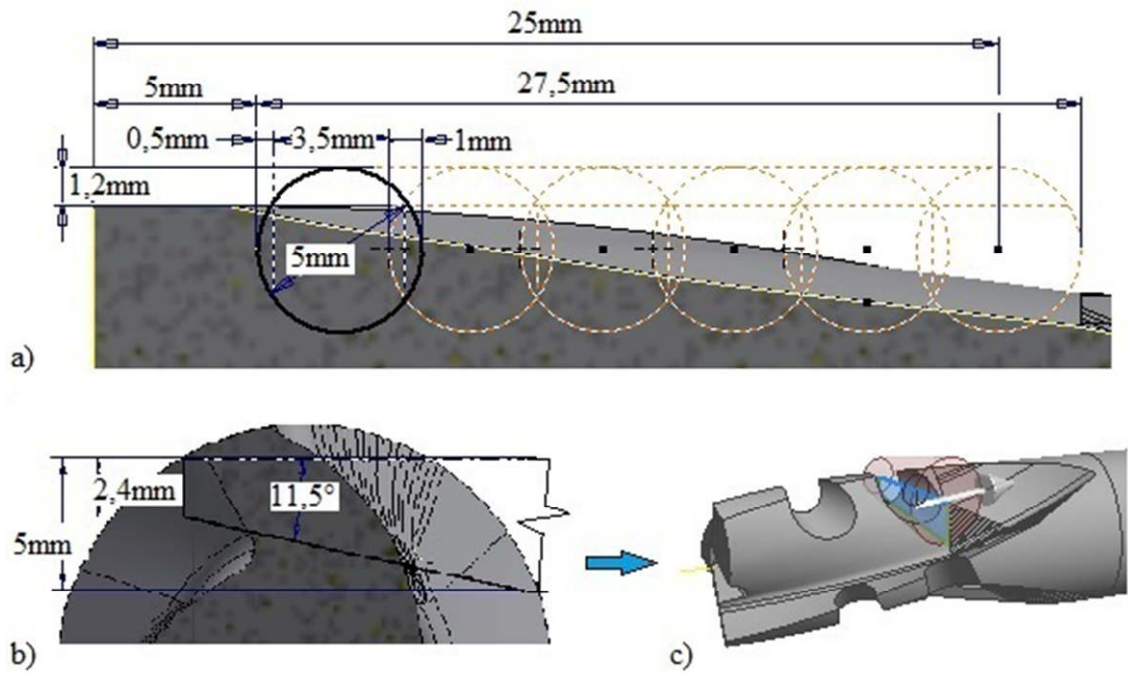
Obr. 7.5 Náčrt brousícího kotouče a dokončený výbrus čela.

Hřbetní plochy nástroje byly vytvořeny pomocí odebrání materiálu vysunutím náčrtu (obr. 7.6a). Po vytvoření hřbetní plochy na prvním zubu je následně plocha pomocí kruhového pole rozkopírována na zbývající zuby frézy (obr. 7.6b).



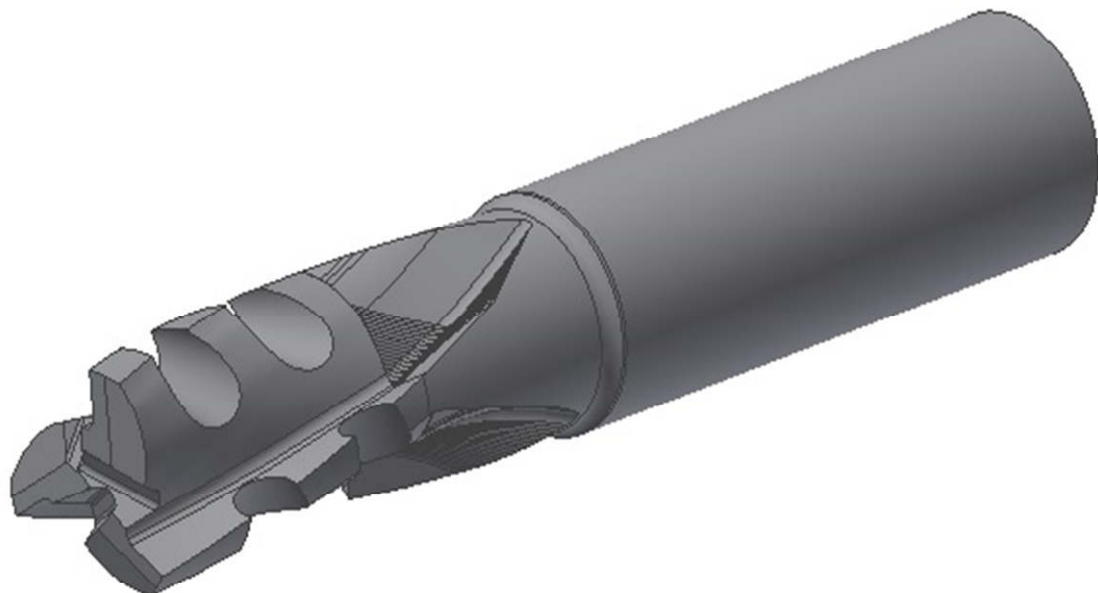
Obr. 7.6 Konstrukce hřbetní plochy nástroje a dokončený výbrus hřbetu.

Konstrukce tzv. „**kompensačních břitů**“ byla provedena na základě odebrání materiálů pomocí rotace kužele (obr. 7.7b). Na každém zubu nástroje jsou vytvořeny dva kompenzační břity (obr. 7.7c), které na sebe při rotaci nástroje kolem své osy plynule navazují (obr. 7.7a), břity jsou přes sebe přesazeny, aby nedocházelo ke zhoršení jakosti povrchu obrobenej plochy. Konstrukce těchto speciálních břitů by měla sloužit k rozložení silového zatížení a k potlačení tahové napjatosti v patě zubu nástroje.



Obr. 7.7 Konstrukce kompenzačních břitů.

Na obr. 7.8 je znázorněný dokončený model nástroje s kompenzačními břitů s potřebným odlehčením hřbetu, které bylo opět provedeno rotací kolem své osy pomocí odebrání materiálu.



Obr. 7.8 Dokončený 3D model frézovacího nástroje s kompenzačními břitů.

V tab. 7.2 jsou znázorněny parametry navrženého prototypu frézovacího nástroje s kompenzačními břitů.

Tab. 7.2 Parametry navrženého frézovacího nástroje.

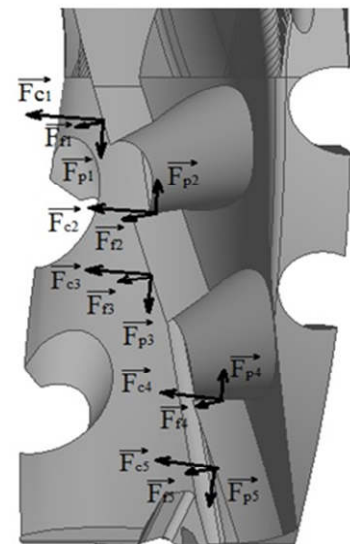
Popis	Označení	Hodnota	Jednotka
Počet zubů	z	3	-
Průměr nástroje	D	20	mm
Úhel sklonu šroubovice	λ_s	17	°
Ortogonální úhel čela	γ_0	7	°
Délka nástroje	L	106	mm
Délka řezné části	l	36	mm
Délka řezné části s výběhem	l_0	48	mm

Na obr. 7.9 je znázorněno předpokládané silové zatížení nástroje s kompenzačními břitý.

$$\vec{F}_C = \vec{F}_{C1} + \vec{F}_{C2} + \vec{F}_{C3} + \vec{F}_{C4} + \vec{F}_{C5}$$

$$\vec{F}_f = \vec{F}_{f1} + \vec{F}_{f2} + \vec{F}_{f3} + \vec{F}_{f4} + \vec{F}_{f5}$$

$$\vec{F}_p = -\vec{F}_{p1} + \vec{F}_{p2} - \vec{F}_{p3} + \vec{F}_{p4} - \vec{F}_{p5} = \mathbf{0}$$



Obr. 7.9 Předpokládané silové zatížení nástroje s kompenzačními břitý.

8 PŘEDBĚŽNÉ ŘEZNÉ ZKOUŠKY

V této kapitole je popsán experiment, který byl použit pro obhajobu SDZ (Státní doktorské zkoušky). Byl zhotoven prototyp frézovacího nástroje metodami frézováním a broušením, který byl následně použit pro řezné zkoušky. Pro porovnání výsledků byla zvolena čelní stopková fréza s pozitivní geometrií od společnosti ZPS-Frézovací nástroje a.s. Dále je popsán materiál obrobku, obráběcí stroj, zvolené řezné podmínky, průběh a vyhodnocení experimentu. Z dat získaných při řezných zkouškách byla provedena pevnostní analýza v programu Autodesk Inventor. Měřenými parametry bylo silové zatížení a statická analýza napjatosti a deformace nástroje.

8.1 Materiál obrobku

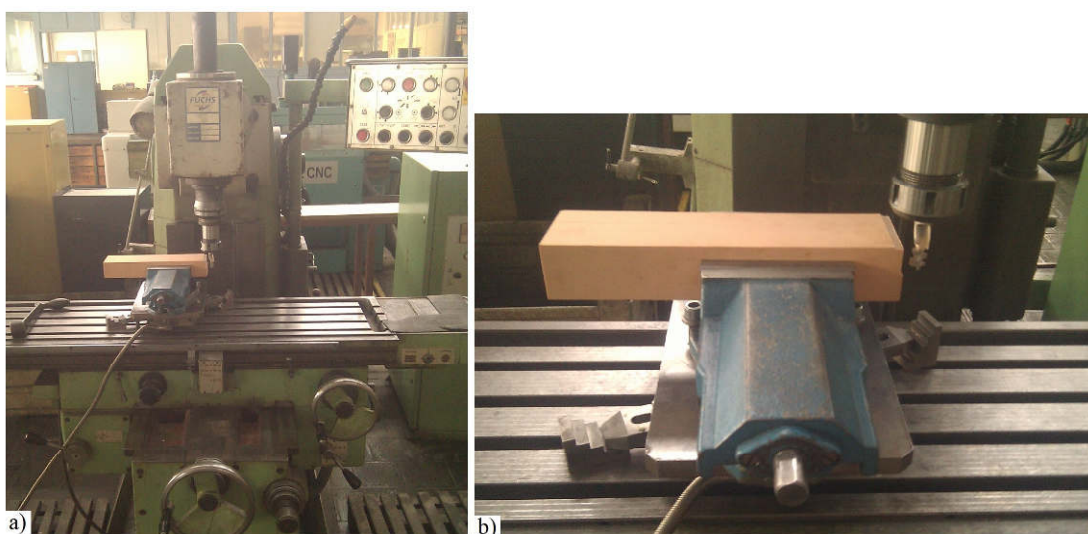
„Umělé dřevo“ SikaBlock M450 o rozměrech 70x50-300mm na bázi polyuretanu bylo zvoleno jako obráběný materiál. Příklady testování obrábitelnosti materiálu SikaBlock lze nalézt v literatuře [60,61]. Pro porovnání silových účinků byl proveden jeden průjezd do hliníkové slitiny AlCu4MgSi (ČSN 42 4201) o rozměrech 40x40-80mm, jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 8.1.

Tab. 8.1 Chemické složení obráběného materiálu podle ČSN 42 4201 [80].

Chemické složení	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ni [%]	Al [%]
42 4201 (AlCu4MgSi)	0,20-0,80	max. 0,7	3,50-4,50	0,40-1,00	0,40-1,00	max. 0,1	max. 0,25	< 0,1	zbytek

8.2 Obráběcí stroj

Pro provedení řezných zkoušek byla zvolena konzolová vertikální frézka s označením FGH 32, která je k dispozici ve strojovém parku ÚST FSI VUT v Brně. Maximální možné otáčky $n=1400\text{min}^{-1}$. Na obr. 8.1 je zobrazen použitý obráběcí stroj a upnutí obrobku.



Obr. 8.1 Konzolová vertikální frézka FGH 32 a upnutí obrobku.

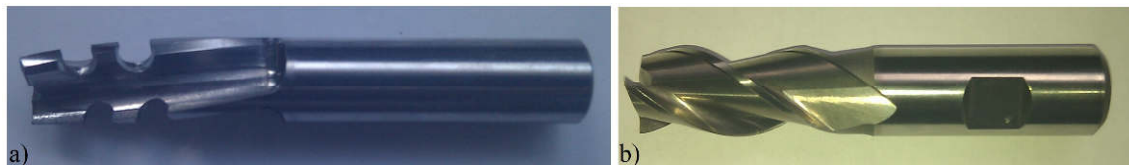
8.3 Obráběcí nástroj

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, nástroj bude vyroben metodami přesného lití ve společnosti ZPS-FN a.s. ve Zlíně. Pro provedení experimentu byl zhotoven prototyp nástroje o rozměrech $\varnothing 14$ -92mm metodami frézování a broušením (obr. 8.2a). Nástroj byl zhotoven z oceli 19 830.3 (ČSN 41 9830) a nebyl po obrobení funkčních ploch tepelně zpracován (zušlechtěn). Chemické složení použitého nástrojového materiálu je znázorněno v tab. 8.2.

Tab. 8.2. Chemické složení HSS oceli ČSN 41 9830 (HS 6-5-2) [81].

Chemické složení	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	W [%]	V [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]
19 830	0,78	0,15	0,20	3,75	0,30	4,50	5,50	1,75	0,25	0,30	0,30
	-	-	-	-		-	-	-			
	1,05	0,40	0,45	4,50		5,50	6,75	2,20			

Pro porovnání navržené geometrie nástroje byla použita tříbřitá válcová čelní stopková fréza o rozměrech $\varnothing 14$ -83mm s pozitivní geometrií od společnosti ZPS-Frézovací nástroje a.s. (obr. 8.2b).



Obr. 8.2 Testované nástroje: a) fréza s kompenzačními břity; b) fréza od společnosti ZPS.

Poznámka: Oba použité nástroje nebyly deponovány PVD povlakem.

8.4 Nastavené řezné podmínky

Pro experiment byly zvoleny řezné podmínky, které byly stanoveny odhadem podle předběžných zkušeností s ohledem na druh obrábění, řezný materiál, obráběný materiál a použitý obráběcí stroj. Frézování probíhalo sousledně bez přívodu procesní kapaliny. Nastavené řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 8.3 a 8.4.

Tab. 8.3 Zvolené řezné podmínky pro obrábění umělého dřeva SikaBlock M450.

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	44/ <u>62</u>	m/min
Otáčky	n	1000/ <u>1400</u>	1/min
Posuvová rychlost	v_f	160/ <u>224</u>	mm/min
Posuv na zub	f_z	0,05	mm
Šířka záběru ostří	a_p	24	mm
Radiální šířka záběru	a_e	<u>3</u> /9	mm

Poznámka: Podtržené hodnoty v tab. 8.3 byly nastaveny pro prvních devět průjezdů (viz obr. 8.6). Pro další testování došlo ke snížení řezné a posuvové rychlosti a k navýšení radiální šířky záběru.

Tab. 8.4 Zvolené řezné podmínky pro obrábění hliníkové slitiny AlCu4MgSi.

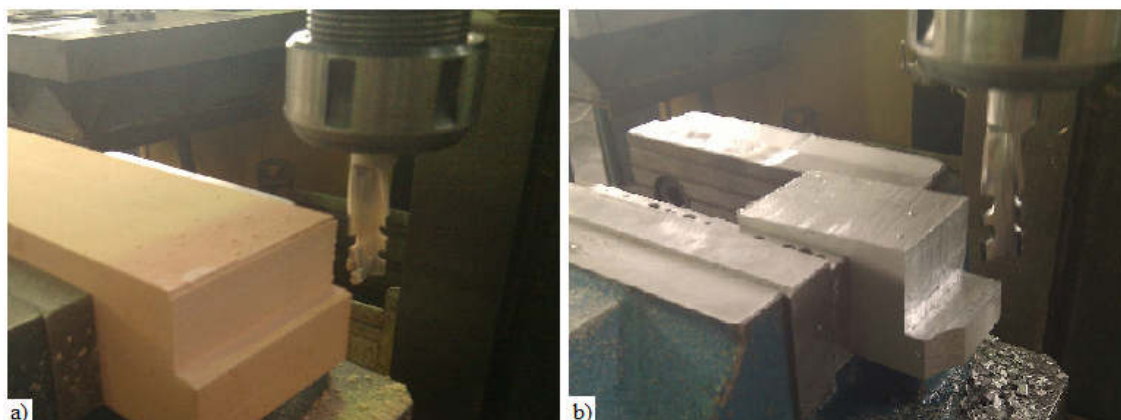
Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	22	m/min
Otáčky	n	500	1/min
Posuvová rychlost	v_f	112	mm/min
Posuv na zub	f_z	0,04	mm
Šířka záběru ostří	a_p	24	mm
Radiální šířka záběru	a_e	3	mm

8.5 Průběh experimentu

Jako první byla testována nová geometrie frézovacího nástroje s kompenzačními břity při obrábění umělého dřeva SikaBlock M450. Počáteční řezná rychlost byla nastavena na 62 m/min a bylo provedeno devět průjezdů při radiální šířce záběru 3mm. Šířka záběru ostří byla po celou dobu testování konstantní (24mm). Dále byly provedeny čtyři průjezdy při řezné rychlosti 44m/min a radiální šířce záběru 9mm. Pro porovnání naměřených hodnot byly provedeny čtyři průjezdy, při stejných řezných podmínkách, nástrojem od společnosti ZPS.

Dále byl proveden jeden průjezd do hliníkové slitiny AlCu4MgSi oběma testovanými nástroji. Byla nastavena řezná rychlost 22 m/min. Jeden průjezd byl proveden z toho důvodu, že nástroj s kompenzačními břity byl již značně opotřebený a nemohl dále efektivně vykonávat svou funkci.

Na obr. 8.3 je znázorněn průběh experimentu pro obrábění obou zvolených obráběných materiálů při použití navrženého frézovacího nástroje.



Obr. 8.3 Testování nového řezného nástroje s kompenzačními břity:

a) obrábění umělého dřeva SikaBlock M450; b) obrábění hliníkové slitiny AlCu4MgSi.

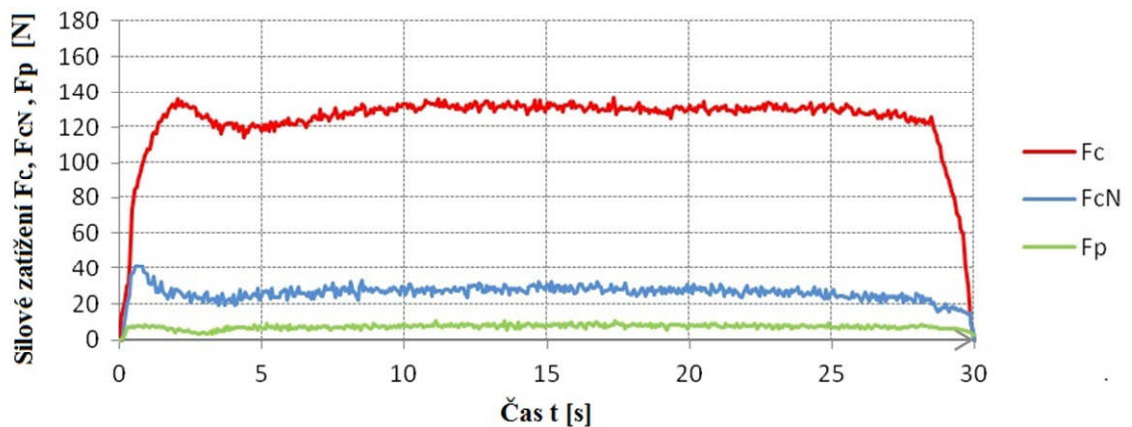
Pro analýzu silového zatížení byl použit Dynamometr KISTLER 9257B vybavený nábojovými zesilovači KISTLER 9011A, který je k dispozici v laboratořích ÚST FSI VUT v Brně. Dynoware software byl použit pro analýzu naměřených dat, ze kterého byly data exportovány do tabulkového editoru Excel. Zapojení celé aparatury je zobrazeno na obr. 8.4.



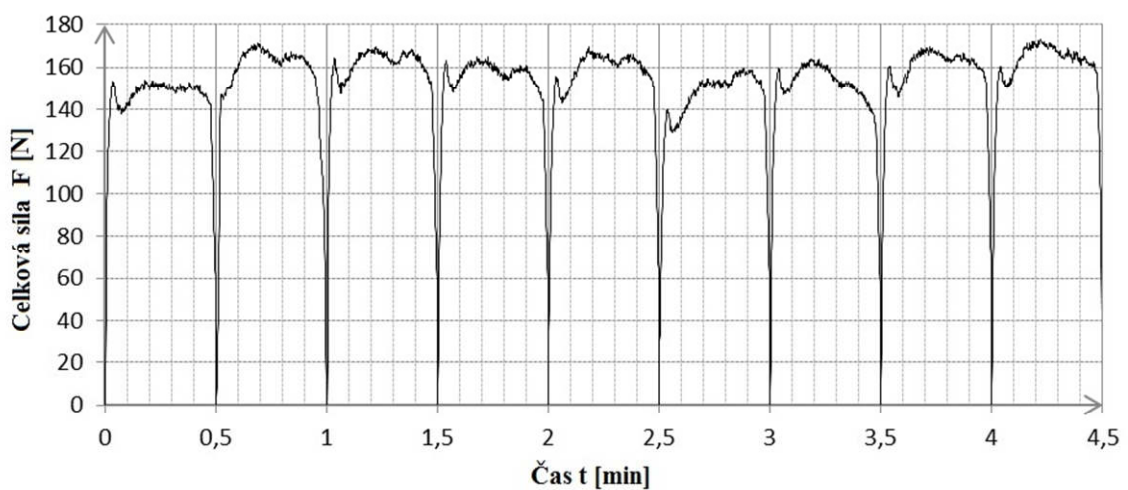
Obr. 8.4 Schéma zapojení měřící aparatury KISTLER 9272B [62].

8.6 Průběhy silového zatížení při frézování umělého dřeva

Na obr. 8.5 jsou vyobrazeny průběhy sil F_c , F_{cN} a F_p pro 1. průjezd při sousledném frézování umělého dřeva SikaBlock M450 při řezné rychlosti $v_c=62\text{m/min}$ a radiální šířce záběru $a_e=3\text{mm}$. Z grafu je patrné, že řezná síla F_c dosáhla maximální hodnoty 140N a měla po celou dobu frézování konstantní průběh.

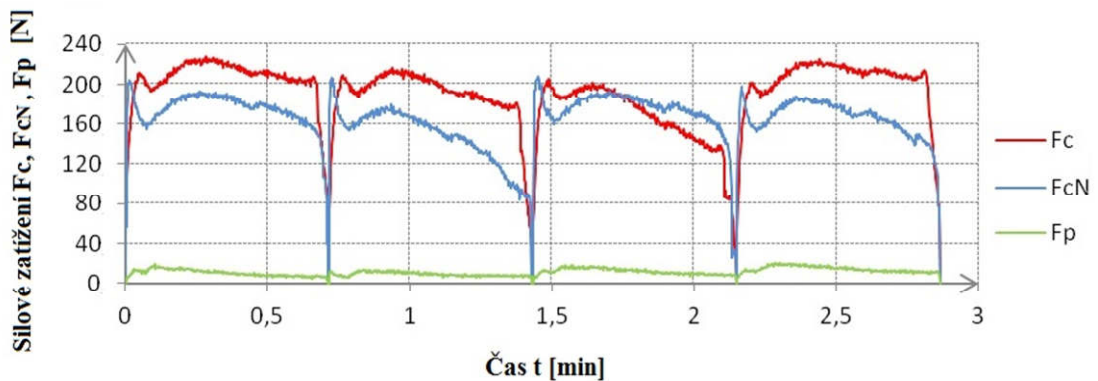


Obr. 8.5 Silové zatížení při frézování nástrojem s kompenzačními břity – 1. průjezd.

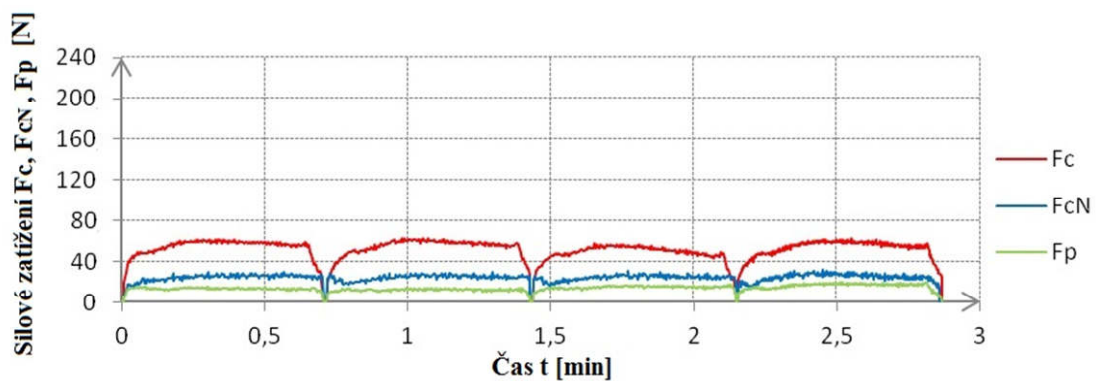


Obr. 8.6 Celková síla F při frézování nástrojem s kompenzačními břity.

Na obr. 8.6 je znázorněn průběh celkové síly F při stejných řezných podmínkách pro všech devět měřených průjezdů. Lze soudit, že celková síla F dosáhla maximální hodnoty 170N a po celou dobu testování měla konstantní průběh.

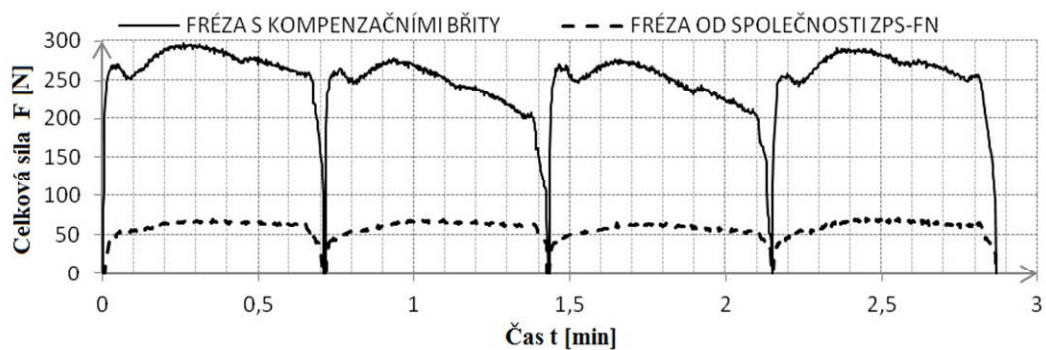


Obr. 8.7 Silové zatížení při frézování nástrojem s kompenzačními břity.



Obr. 8.8 Silové zatížení při frézování nástrojem od společnosti ZPS.

Na obr. 8.7 a 8.8 jsou vyobrazeny průběhy sil F_c , F_{cN} , F_p při sousledném frézování umělého dřeva SikaBlock M450, kdy došlo ke snížení řezné a posuvové rychlosti ($v_c=44\text{m/min}$, $v_f=160\text{mm/min}$), naopak radiální šířka záběru byla zvýšena na $a_c=9\text{mm}$. Z grafů je patrné, že silové složky měly po celou dobu testování (4 průjezdy) konstantní průběh. Maximální hodnota řezné síly F_c při použití nově navrženého nástroje dosáhla 220N a 55N při použití katalogového nástroje.

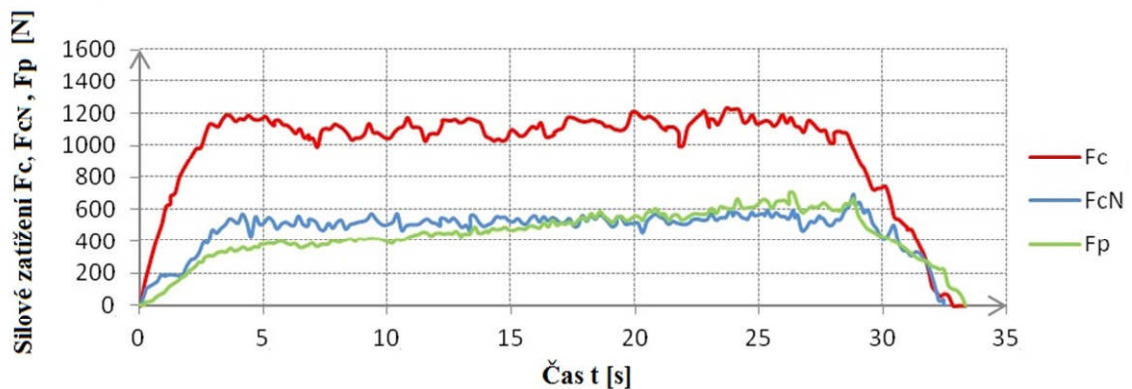


Obr. 8.9 Průběh celkových sil při frézování umělého dřeva SikaBlock M450.

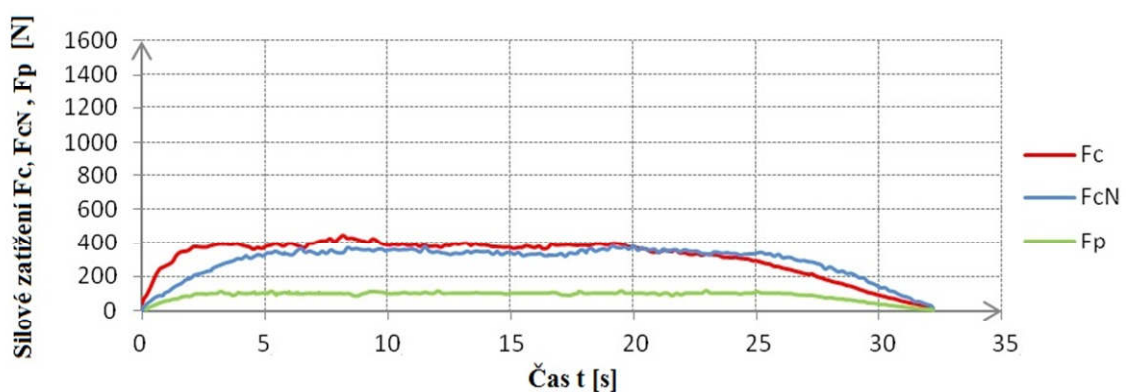
Porovnání celkové síly F při použití obou testovaných nástrojů za stejných řezných podmínek je znázorněno na obr. 8.9. Lze pozorovat, že celková síla F dosáhla maximálních hodnot 300N při použití nástroje s kompenzačními břity a maximálních hodnot 60N při použití stopkové frézy od společnosti ZPS-FN a.s. Je patrné, že při použití nového nástroje byla celková síla F přibližně 5x větší v porovnání s katalogovým nástrojem. Nárůst byl pravděpodobně způsoben neproběhlým tepelným zpracováním, které nebylo provedeno v důsledku nedostatku času ke konci termínu odevzdání doktorského minima.

8.7 Průběhy silového zatížení při frézování hliníkové slitiny

Pro porovnání dat získaných při obrábění dřeva byl proveden jeden průjezd do hliníkové slitiny AlCu4MgSi. Z průběhu silových složek je patrné, že při použití katalogového nástroje bylo frézování stabilnější a řezná síla F_c dosáhla maximální hodnoty 400N (obr. 8.11). Při použití nástroje s nově navrženou geometrií břitů dosáhla řezná síla F_c maximální hodnoty 1200N (obr. 8.10).



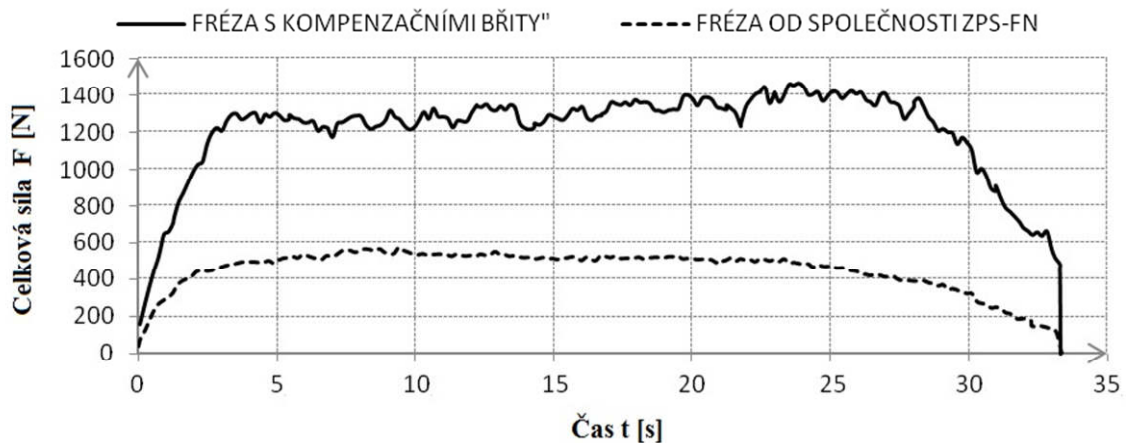
Obr. 8.10 Silové zatížení při frézování nástrojem s kompenzačními břity.



Obr. 8.11 Silové zatížení při frézování nástrojem od společnosti ZPS.

Porovnání celkových sil při použití obou testovaných nástrojů při stejných řezných podmínkách je znázorněno na obr. 8.12. Lze pozorovat, že celková síla F dosáhla

maximálních hodnot 1400N při použití nástroje s kompenzačními břity a maximálních hodnot 600N při použití stopkové frézy od společnosti ZPS-FN a.s.



Obr. 8.12 Průběh celkové síly F při frézování hliníkové slitiny AlCu4MgSi.

8.8 Pevnostní analýza navržené geometrie

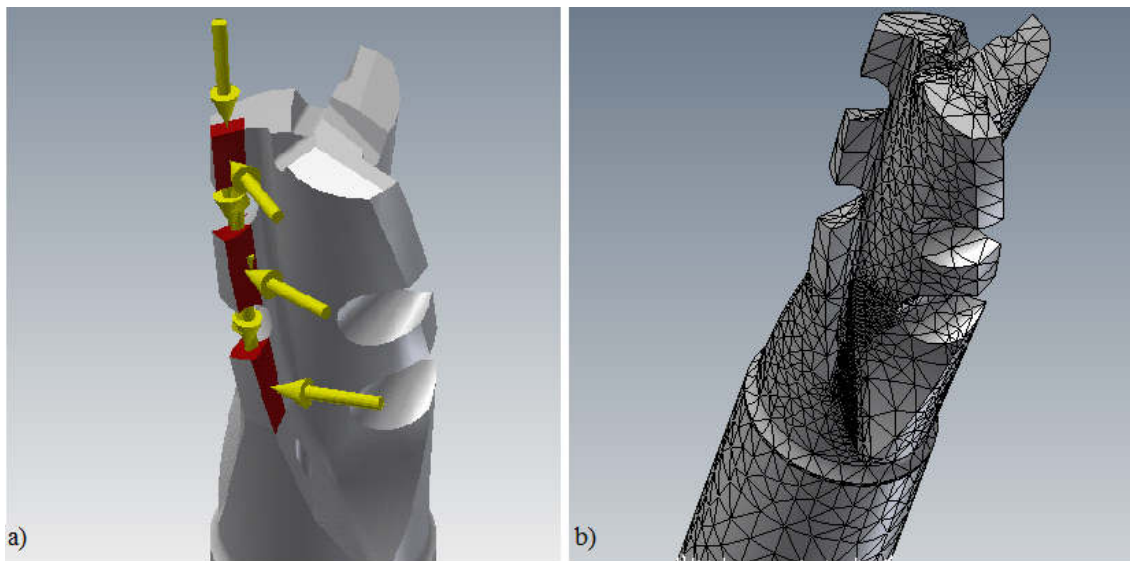
Pro pevnostní analýzu byla použita navržená geometrie stopkové čelní válcové frézy, opatřené kompenzačními břity, vytvořená v systému Autodesk Inventor 2013, ve kterém byla provedena i pevnostní analýza.

8.8.1 Předpokládané silové zatížení nástroje

Plocha, na kterou působí řezné síly je obecného tvaru. Stanovení této plochy je velice obtížné, protože se jedná o zcela obecnou plochu. Pro výpočet byla použita plocha určená šířkou záběru a_e . Z toho důvodu, že je každý břit opatřen tzv. kompenzačními břity, bylo nutné plochu rozdělit na několik segmentů a následně silově zatížit (obr. 8.13a). V případě katalogových nástrojů, které nejsou opatřeny kompenzačními břity, je pro statický výpočet maximálního zatížení při pevnostní analýze zvolena jednotná plocha a působící síla, která ovlivní výpočtový model pouze minimálně. Použitý výpočtový model rozdělí působící sílu rovnoměrně na celou plochu břitu nástroje [17].

U nově navržené geometrie stopkové frézy bylo nutné plochu rozdělit do osmi segmentů a zatížit každý segment jednotlivě z toho důvodu, že je každý břit nástroje opatřen dvěma kompenzačními břity. Výsledkem bylo minimální ovlivnění výpočtového modelu. Použitý výpočtový model rozdělí působící sílu rovnoměrně na každý segment zatěžované plochy břitu nástroje.

Pro statické zatížení nástroje bylo použito naměřených dat získaných pomocí dynamometru KISTLER při frézování umělého dřeva SikaBlock M450 a hliníkové slitiny AlCu4MgSi. Síť konečných prvků (obr. 8.13b) je složena z trojúhelníků o velikosti 0,2mm, která byla v předpokládaných oblastech koncentrace napětí, v místě kompenzačních břitů a ve výběhu broušícího kotouče) zjemněna na 0,1mm.

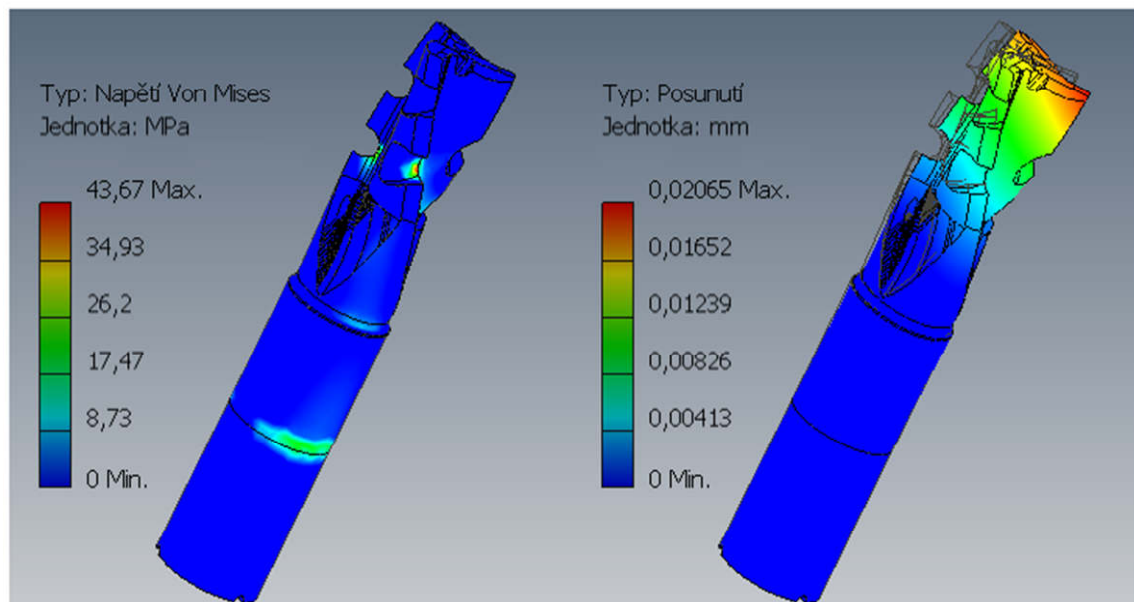


Obr. 8.13 Předpokládané silové zatížení a vysíťovaný model nástroje.

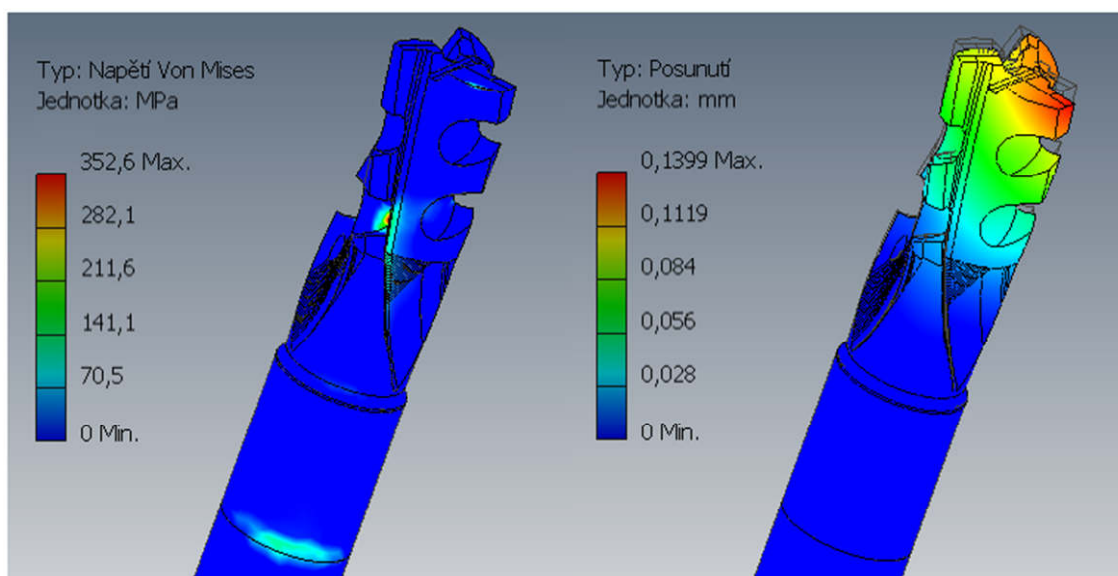
8.8.2 Statická analýza napjatosti a deformace nástroje

Pro provedení statické analýzy byla použita data získaná z testování nástroje při obrábění „umělého dřeva“ SikaBlock M450 a hliníkové slitiny AlCu4MgSi.

Z toho důvodu, že je nástroj opatřen kompenzačními břity, má každý břit nástroje specifickou geometrii a bylo tedy nutné rozdělit silové zatížení na jednotlivé segmenty zatěžující plochy podle velikosti daného segmentu. Z těchto důvodů je patrné, že silové zatížení není rozloženo na každém ze tří břitů stejně.



Obr. 8.14 Statická analýza napjatosti a deformace nového nástroje na začátku testování (z dat získaných při obrábění „umělého dřeva“ SikaBlock M450).



Obr. 8.15 Statická analýza napjatosti a deformace nového nástroje na konci testování (z dat získaných při obrábění hliníkové slitiny AlCu4MgSi).

Poznámka: V práci je dále uvedena pouze pevnostní analýza při zatížení břitu č. 3 (břit č. 3 viz obr. 7.6) a to z toho důvodu, že bylo dosaženo přibližně stejných hodnot redukovaného napětí podle podmínky HMM a hodnot posunutí nástroje ve srovnání s břity č. 1 a 2.

Na obr. 8.14 a 8.15 je vyobrazena statická analýza napjatosti a deformace nástroje po silovém zatížení břitu č. 3. **V obou případech byla nalezena dvě významná místa s koncentrací napětí.** Tyto místa byly shodné pro ostrý i částečně opotřebený břit nástroje:

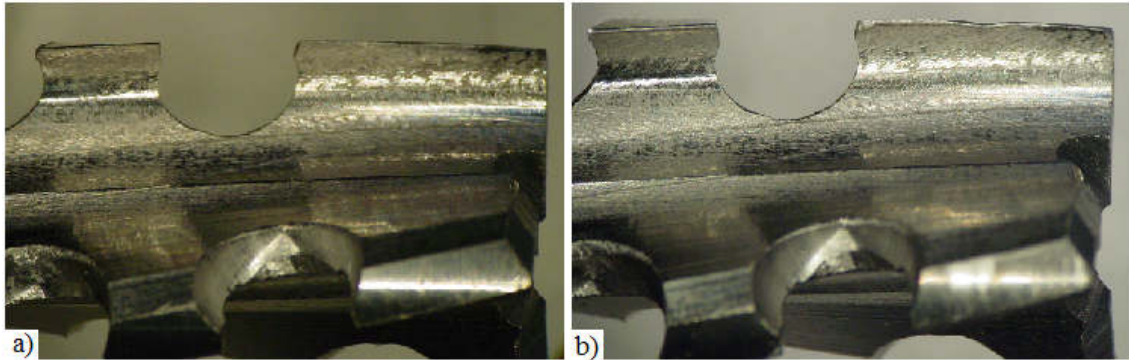
- **kompensační břit** – je namáhaný nejvíce z celého nástroje, důsledkem je ostrá čelní plocha, která tvoří napjatostní vrub,
- **upnutí nástroje** – koncentraci napětí je možné pozorovat v místě upnutí nástroje.

Z analýzy je dále patrné, že v obou případech došlo k významnému potlačení tahové napjatosti v místě paty zubu. Při obrábění umělého dřeva dosáhlo redukované napětí podle podmínky HMM (von Mises) maximálních hodnoty 44MPa (na počátku obrábění) a po provedeném testování hodnoty 50MPa. Při obrábění hliníkové slitiny dosáhlo redukované napětí maximální hodnoty 352,6Mpa, byl proveden pouze jeden průjezd. V obou případech bylo maximálních hodnot dosaženo v místě kompenzačního břitu nástroje.

Výsledné hodnoty odpovídají cyklickému namáhání nástroje a jsou oproti reálnému stavu s působením dynamických rázů rozdílné, významná místa s koncentrací napětí zůstávají stejná.

8.9 Opotřebení břitu

Na obr. 8.16 je znázorněno opotřebení břitu po provedených řezných zkouškách. Opotřebení břitu nebylo měřeno pomocí mikroskopu, z toho důvodu nebyla stanovena hodnota používaného kritéria VB.



Obr. 8.16 Opotřebení břitu nástroje s kompenzačními břitů po provedených řezných zkouškách při sousledném frézování: a) umělého dřeva SikaBlock M450; b) hliníkové slitiny AlCu4MgSi.

Rychlé opotřebení řezného nástroje bylo pravděpodobně způsobeno neprovedeným tepelným zpracováním nebo také špatnou volbou řezných podmínek a obráběcího stroje.

8.10 Závěry experimentu

Katalogový nástroj od společnosti ZPS-Frézovací nástroje vykazoval nižší hodnotu celkové síly F při frézování obou použitých materiálů (umělého dřeva SikaBlock M450 a hliníkové slitiny AlCu4MgSi) než nově navržený prototyp frézovacího nástroje s kompenzačními břitů. Celková síla F byla 5x menší (umělé dřevo) a 2,33x menší (hliníková slitina) v porovnání s nově navrženou geometrií frézovacího nástroje. Z výsledků je dále patrné, že při použití katalogového nástroje bylo možné pozorovat stabilnější průběh jednotlivých silových složek při obrábění obou použitých materiálů.

Zvýšené silové zatížení při použití nového nástroje bylo pravděpodobně způsobeno tím, že nástroj nebyl tepelně zpracován (zušlechtěn), byl pouze v měkkém stavu, dále nastavením řezných podmínek (suché obrábění) a stabilitě vertikální frézky FGH32.

Navržená geometrie nástroje byla pevnostně ověřena na základě dat získaných z provedených experimentů. Pomocí systémového prostředí pevnostní analýzy v programu Autodesk Inventor byla zjištěna dvě významná místa koncentrace napětí podle podmínky HMH (von Mises), v místě kompenzačních břitů a v místě upnutí nástroje.

Statická analýza tedy potvrdila, že redukované napětí podle podmínky HMH se koncentrovalo především v místě kompenzačních břitů. Konstrukce speciálních kompenzačních břitů na každém ze tří břitů nástroje je především určena pro potlačení (redukování) tahové napjatosti v patě zubů tak, aby nástroj nebyl vytahován z řezu.

Na základě dat získaných při obrábění umělého dřeva SikaBlock M450 dosáhlo redukované napětí podle podmínky HMH na počátku obrábění maximálních hodnot

44MPa, na konci obrábění hodnot 50MPa. Při obrábění hliníkové slitiny AlCu4MgSi dosáhlo max. hodnoty 352,6MPa.

Pro zlepšení mechanických vlastností a prodloužení trvanlivosti navržené geometrie nového frézovacího nástroje, byla pro další testování, zvolena následující kritéria:

- výroba nástroje pomocí technologie přesného lití,
- přebroušení funkčních částí nástroje,
- tepelné zpracování (kalení + popouštění) nástroje,
- depozice PVD povlaku,
- volba stabilnějšího obráběcího stroje,
- volba materiálu obrobku,
- nastavení řezných podmínek (použití procesní kapaliny).

9 VÝROBA PROTOTYPU FRÉZOVACÍHO NÁSTROJE

Na základě navržené geometrie frézovacího nástroje byla jako hlavní výrobní technologie zvolena metoda přesného lití do skořepinové formy pomocí vytavitelného voskového modelu. Na základě vytisknutého plastového modelu nástroje byla vyrobena dvoudílná silikonová forma, do které byly odlity voskové modely, které slouží pro výrobu skořepinové formy. Po samotném odlití nástrojů následuje žihání naměkko, aby bylo možné funkční plochy prototypu nástroje přebrousit. Dalším krokem je tepelné zpracování (kalení a popouštění) a depozice PVD povlaků.

9.1 Plastový prototyp

Na základě navržené geometrie (obr. 7.8) byl 3D model převeden do formátu stl., který je potřebný pro 3D tisk prototypu nástroje. Tisk proběhl na 3D tiskárně uPrint od společnosti Stratasys [72]. Jako stavební materiál byl použit termoplast **ABSplus**, jehož mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 9.1.

Pro 3D tisk byla použita metoda **FDM (Fused Deposition Modeling)**. Tato metoda spočívá v natavování termoplastického materiálu, navinutého ve formě drátu na cívce, která se vkládá do zařízení ve speciálních kazetách, ze kterých je materiál vtlačován do vyhřívacích trysek a následně je nanášen (tisknut) po jednotlivých vrstvách na základovou desku (obr. 9.1). Zařízení disponuje dvěma kazetami, v nichž jsou uloženy materiály: **stavební** (ABSplus) a **podpůrný**. Podpůrný materiál slouží proti zborcení tisknutého modelu a po dokončeném tisku je odstraněn mechanickou nebo chemickou cestou [74].



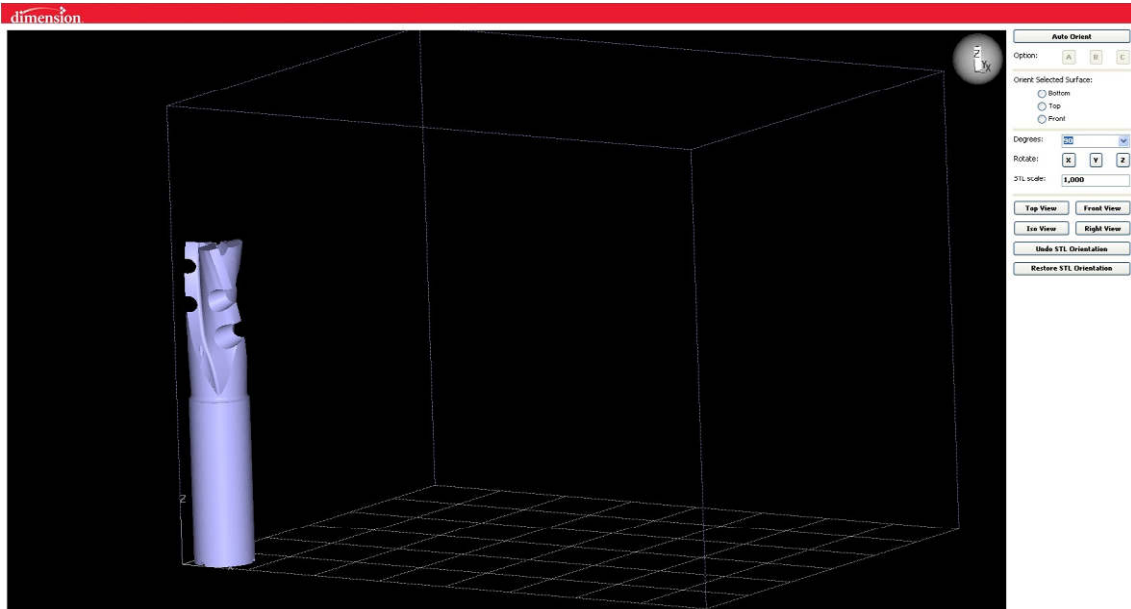
Obr. 9.1 Princip nanášení jednotlivých vrstev pomocí technologie FDM [74].

Nastavení 3D tisku nového prototypu frézovacího nástroje na tiskárně uPrint bylo provedeno pomocí softwaru CatalystEX, ve kterém bylo nutné nejprve nastavit měřítko a jednotku (mm), dále zadat tloušťku tištěné vrstvy (**0,254mm**), způsob vyplnění modelu (solid – varianta solid je volena v případě, kdy je kladen důraz na vyšší pevnost a odolnost součásti, tato varianta byla zvolena z důvodu kompenzačních břitů nástroje) a dále způsob vyplnění podpůrného materiálu (sparse – varianta minimalizuje množství potřebné podpory). Na obr. 9.2a je zobrazeno zařízení pro výrobu plastového prototypu frézovacího nástroje, 3D tiskárna uPrint. Pro odstranění podpůrného materiálu byla použita ultrazvuková čistička (obr. 9.2b).



Obr. 9.2 Použité zařízení pro výrobu plastového prototypu nástroje:
a) 3D tiskárna uPrint; b) ultrazvuková čistička.

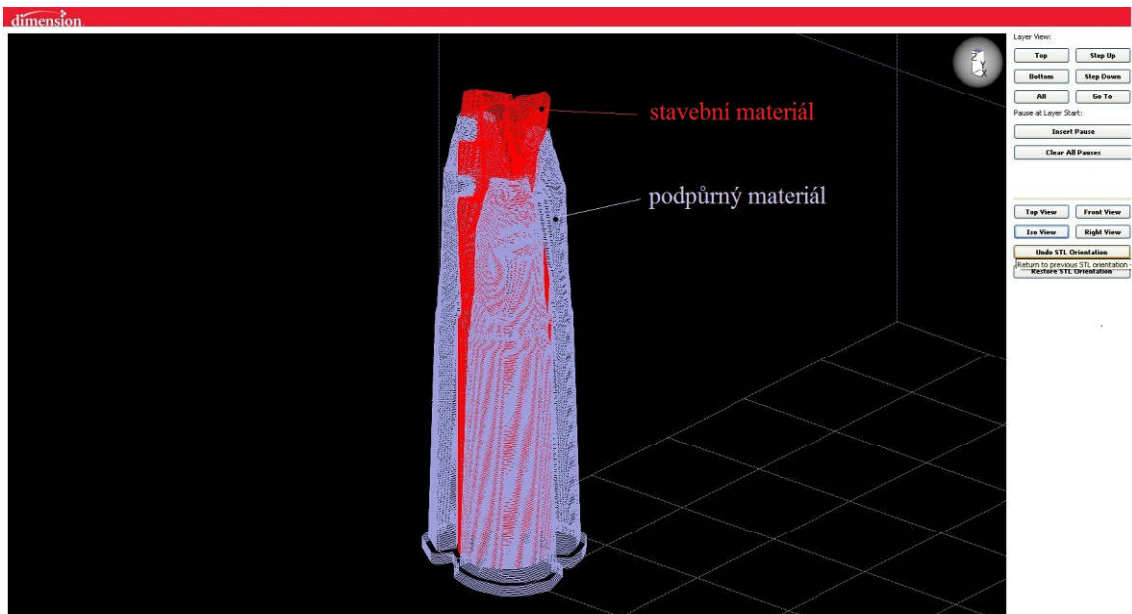
Na obr. 9.3 je zobrazeno umístění tištěného modelu v pracovním prostoru 3D tiskárny uPrint v softwaru CatalystEX. Rozměry tištěného 3D modelu jsou limitovány pracovním prostorem tiskárny uPrint, které jsou 203 x 152 x 152 mm, což pro tisk prototypu nástroje bylo dostačující. Na obr. 9.4 jsou znázorněny jednotlivé tištěné vrstvy obou použitých materiálů, ABS plus a tištěné podpory.



Obr. 9.3 Orientace tištěného modelu v softwaru CatalystEX.

Jak již bylo zmíněno výše, pro tištění podpory byla zvolena varianta „sparse“, která minimalizuje množství tištěného podpurného materiálu. Z obr. 9.4 je patrné, že z důvodu kompenzačních břitů na každém břitu nástroje bylo zapotřebí tisknout podpurný materiál ve větším množství, aby nedošlo ke zborcení modelu. Z důvodu

pevnostních vlastností nebylo možné 3D model orientovat jinak i za předpokladu nižších nákladů na výrobu plastového prototypu. Pro 3D tisk prototypu nástroje bylo spotřebováno $25,69\text{cm}^3$ stavebního a $9,05\text{cm}^3$ podpůrného materiálu. Celkový čas pro tisk byl pomocí softwaru CatalystEX stanoven na 4,21hod.



Obr. 9.4 Zobrazení stavebního a podpůrného materiálu potřebného pro 3D tisk prototypu.

Po odstranění podpůrného materiálu bylo nutné povrch plastového prototypu vytmelit a vybrousit z toho důvodu, že 3D tisk probíhal po jednotlivých vrstvách (obr. 9.1) a na modelu byly již okem patrné jednotlivé vytištěné vrstvy. Pro vytmelení modelu byl použit nátěrový tmel Motip Filler. Po zaschnutí tmelu (cca 2 hodiny) následovalo broušení za mokra pomocí vody a jemného brusného papíru. Celý proces se několikrát opakoval, aby bylo dosaženo hladkého povrchu. Vytmelený a vybroušený plastový prototyp nového frézovacího nástroje je zobrazen na obr. 9.5.



Obr. 9.5 Vytmelený a vybroušený plastový prototyp.

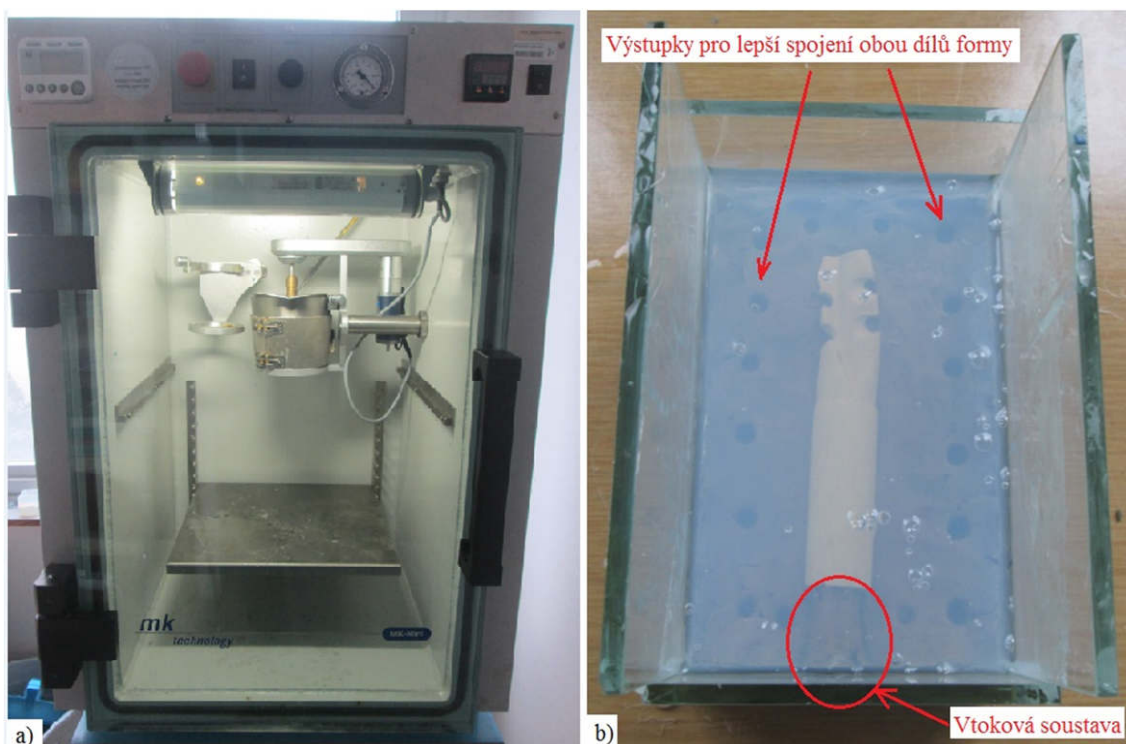
Tab. 9.1 Mechanické vlastnosti termoplastu ABSplus [73].

Mechanické vlastnosti	Rozsah hodnot	Jednotka
Pevnost v tahu	36	MPa
Modul pružnosti v tahu	2300	MPa
Pevnost v ohybu	52	MPa
Modul pružnosti v ohybu	2200	MPa
Poměrné prodloužení	4	%

9.2 Silikonová forma

Technologie vakuového lití je jedna z nejčastěji používaných metod pro zhotovení prototypů nástrojů, jelikož výroba kovových forem je značně nákladná.

Prvním krokem bylo zhotovení stěn formy, kdy pro tuto konstrukci byly použity nařezaná sklíčka. Do takto vzniklého skleněného boxu bylo nutné pomocí plastické hmoty vyplnit tu část, která bude odlitá jako druhý kus, jedná se tedy o dvoudílnou formu. Do plastické hmoty se „vmáčknul“ vytmelený a vybroušený plastový matečný model tak, aby byla správně zvolená dělicí rovina. Správné zvolení dělicí roviny je velice důležité, protože může nastat případ, kdy po odlití vosku do formy se špatně zvolenou dělicí rovinou dojde k destrukci nejen voskového modelu, ale také celé formy. Před samotným zaformováním plastového modelu do plastické hmoty je třeba stanovit, kde bude zvolena vtoková soustava (obr. 9.6b). Aby oba kusy do sebe lépe zapadly, jsou oba díly silikonové formy opatřeny výstupky.



Obr. 9.6 Vakuový licí systém MK-Mini a zhotovený horní díl silikonové formy.

Do takto připravené formy byla nalita dvousložková silikonová hmota, která se skládá ze silikonového kaučuku SILASTIC T-4 a z vytvrzující složky SILASTIC T-4

Curing Agent, namíchaná v poměru 10:1. Po smíchání obou složek byl kelímek se silikonovou hmotou vložen do vakuového licího systému MK-Mini (obr. 9.6a) z důvodu odstranění nežádoucích bublin (obr. 9.7), které v průběhu vakuování vyplouvají na hladinu. Vlastnosti silikonové hmoty jsou znázorněny v tab. 9.2.

Je velice důležité, aby byly odstraněny všechny bubliny směrem od povrchu matečného modelu, z důvodu co nejpřesnějšího „otřštění“ modelu do vznikající silikonové formy.

Tab. 9.2 Vlastnosti použité silikonové směsi [75].

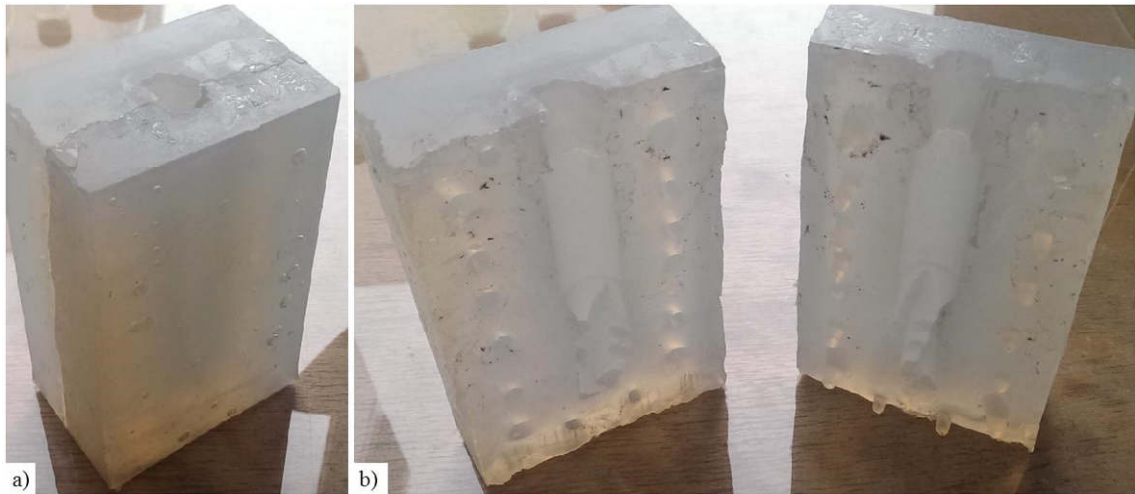
Vlastnosti silikonové směsi	Rozsah hodnot	Jednotka
Viskozita	35000	mPa.s
Pevnost v tahu	6,7	MPa
Tažnost	52	%
Tvrdość dle Shorea	40	HSh
Doba vytvrzování při 23°C	12	hod

Doba vakuování je především závislá na objemu silikonové hmoty, přičemž se musí samotný proces několikrát zastavit a znovu spustit, aby nedošlo k vytečení hmoty z kelímku (obr. 9.7b). Samotný proces je ukončen v době, kdy dojde k samovolnému praskání bublin a hladina silikonové hmoty je nadále ustálena (obr. 9.7c). Takto vzniklá směs je nalita do připraveného skleněného boxu. Vytvrzení silikonové směsi nejčastěji probíhá za pokojové teploty nebo rychleji v peci za vyšší teploty.



Obr. 9.7 Příprava silikonové hmoty: a-b) proces vakuování silikonové hmoty; c) připravená silikonová hmota.

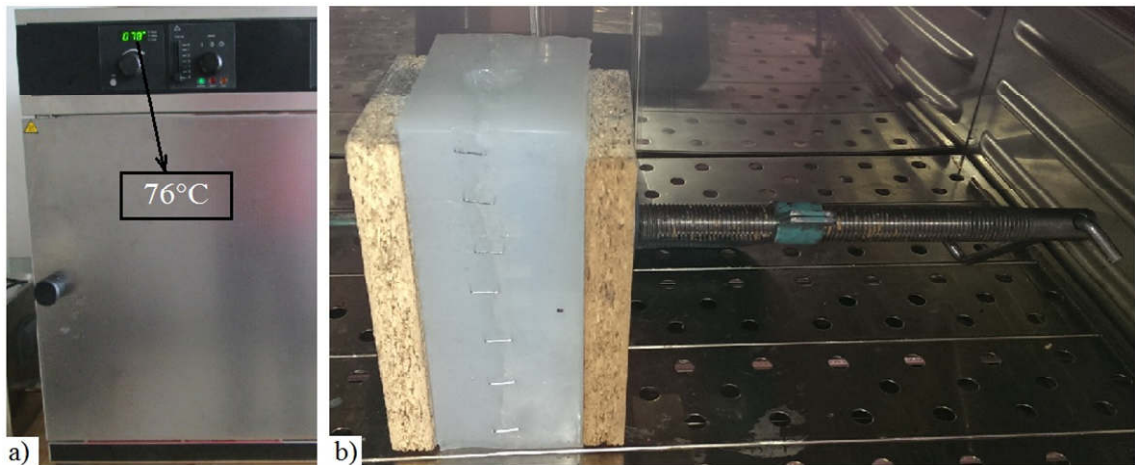
Poznámka: V případě prototypu frézovacího nástroje bylo pro horní díl silikonové formy použito 385g silikonové směsi, což odpovídá 350g silikonového kaučuku SILASTIC T-4 a 35g vytvrzovací složky. Samotný proces vakuování trval 30min a byl 5x zastaven a znovu spuštěn, z důvodu přetékání silikonové směsi přes okraje kelímku. Stejně množství silikonové hmoty i doba přípravy byla stejná pro spodní díl formy. Vzniklá silikonová forma je znázorněna ve složeném i rozloženém stavu na obr. 9.8.



Obr. 9.8 Připravená dvoudílná silikonová forma, určená pro výrobu voskových modelů prototypu frézovacího nástroje: a) složená forma; b) rozložená forma.

9.3 Voskový model

Po zhotovení horního i dolního dílu silikonové formy následovala výroba voskových modelů prototypu frézovacího nástroje, které jsou potřebné pro výrobu skořepinové formy, do které budou již následně odlity prototypy z rychlořezné oceli. Počet voskových modelů byl stanoven na 15ks.



Obr. 9.9 Proces předehřívání silikonové formy: a) ohřívací pec; b) forma stáhnutá svorkou.

Před samotným odléváním voskových modelů bylo nutné dvoudílnou silikonovou formu spojit pomocí kovových kancelářských spon, aby nedocházelo k nežádoucímu odtékání vosku mimo formu. Z důvodu stálého vytékání vosku bylo po několika testech rozhodnuto, že je nutné formu stáhnout pomocí zámečnické svorky (obr. 9.9b). Takto připravenou formu bylo dále nutné předehřát na teplotu 76°C po dobu 1 až 2 hodin (obr. 9.9a), aby bylo docíleno lepší zabíhavosti vosku.

Pro odlévání voskových modelů byl zvolen granulovaný vosk s označením A7-TGG/09 (obr. 9.10) od společnosti Blayson [76]. Tento vosk se běžně používá

pro klenotnický průmysl a byl zvolen s ohledem na konstrukci řezného nástroje (na každém ze tří břitů nástroje se vyskytují dva kompenzační břity, kde by mohlo dojít ke špatné zabíhavosti vosku). Popis a vlastnosti použitého voskového granulátu jsou zobrazeny v příloze 2.



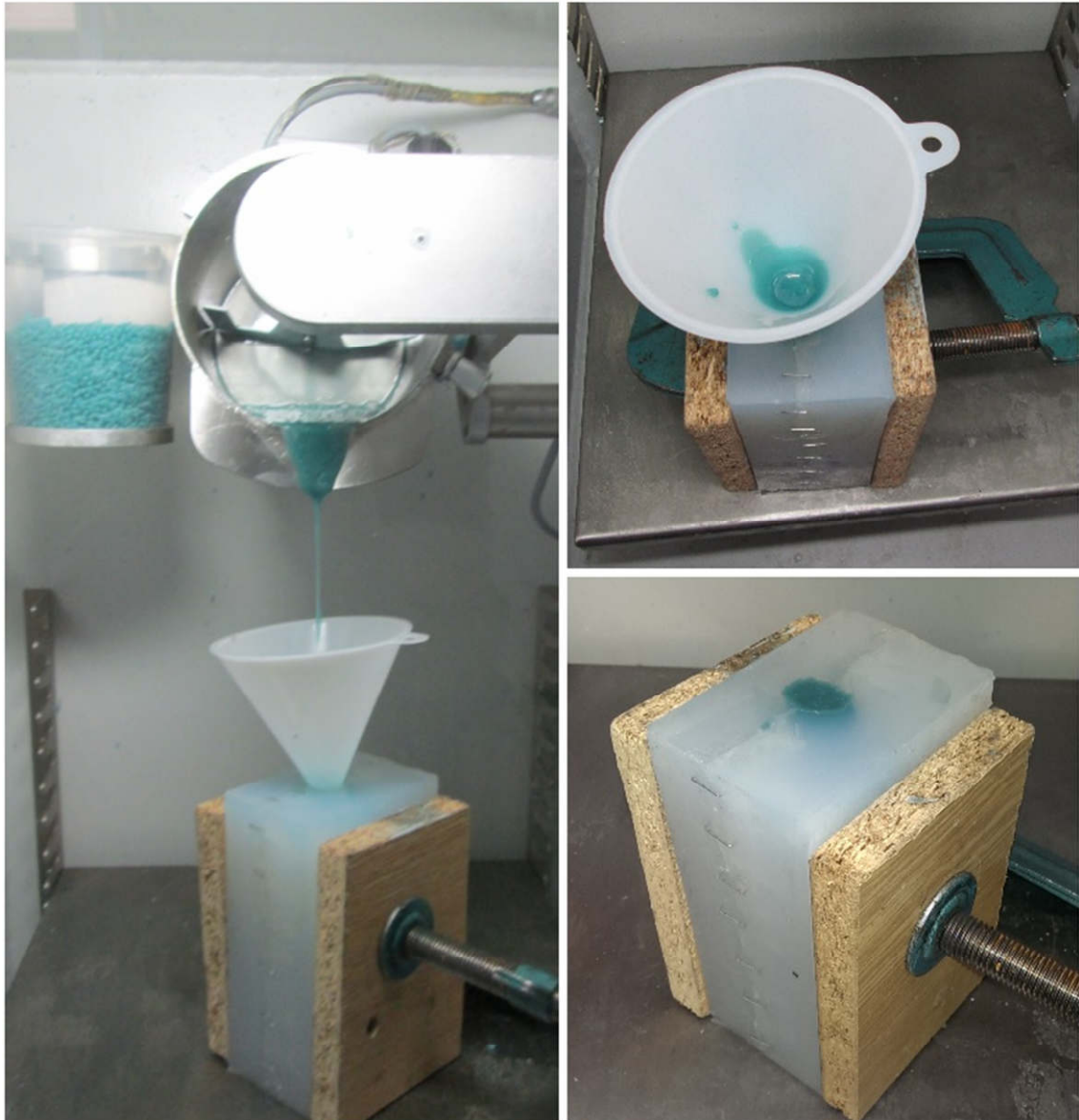
Obr. 9.10 Licí kelímek HotCup vakuového licího zařízení MK-Mini.

V průběhu ohřívání silikonové formy byl voskový granulát ohříván na teplotu 80°C v kelímku „HotCup“ (obr. 9.10), který je součástí vakuového licího systému MK-Mini. Samotné odlévání vosku bylo provedeno ve vakuu co nejrychlejším způsobem z důvodu rychlého tuhnutí voskového materiálu. Celý proces odlití je zobrazen na obr. 9.12. Pro rychlejší tuhnutí voskového materiálu byla silikonová forma s voskem vložena do chladicího zařízení, kde po ztuhnutí vosku (cca 2hod) došlo k rozložení silikonové formy a opatrnému vyjmutí voskového modelu. Zhotovené voskové modely jsou zobrazeny na obr. 9.11.



Obr. 9.11 Odlité voskové modely.

Poznámka: 15ks voskových modelů bylo předáno společnosti ZPS-Frézovací nástroje a.s. [46], se sídlem ve Zlíně, kde byly provedeny finální úpravy řezného nástroje (broušení, tepelné zpracování). Společnost ZPS je v blízkém kontaktu se společností Slévárna přesných odlitků SPO s.r.o. [77], se sídlem ve Zlíně, ve které byla provedena výroba skořepinové formy a následné odlití kovových prototypů.



Obr. 9.12 Proces odlití voskové směsi do připravené silikonové formy.

9.4 Skořepinová forma

Nejprve bylo nutné voskové modely sestavit do tzv. licího stromečku (obr. 9.13), kde dojde k připojení vtokové soustavy. Modely se na vtokovou soustavu připojují lepením nebo pájením.

Pro výrobu skořepinové formy byla použita metoda pájení, kdy se mezi vtokovou soustavu a voskový model vloží pájedlo. Po natavení dosedacích ploch se pájedlo

vytáhne a model se přitiskne ke vtokovému systému. Tvar licího stromečku musí být navržen tak, aby byl k připojení vtokové soustavy umožněn dobrý přístup a nedošlo k poškození modelu při procesu pájení. Dále je při konstrukci licího stromečku důležité, aby byly modely připojeny dutinami dolů z toho důvodu, že obalová hmota musí stékat, aby se zabránilo zvětšování tloušťky modelu v dutinách. Celé sestavení musí zajistit bezproblémové vytavování modelů ze vzniklé formy [78].

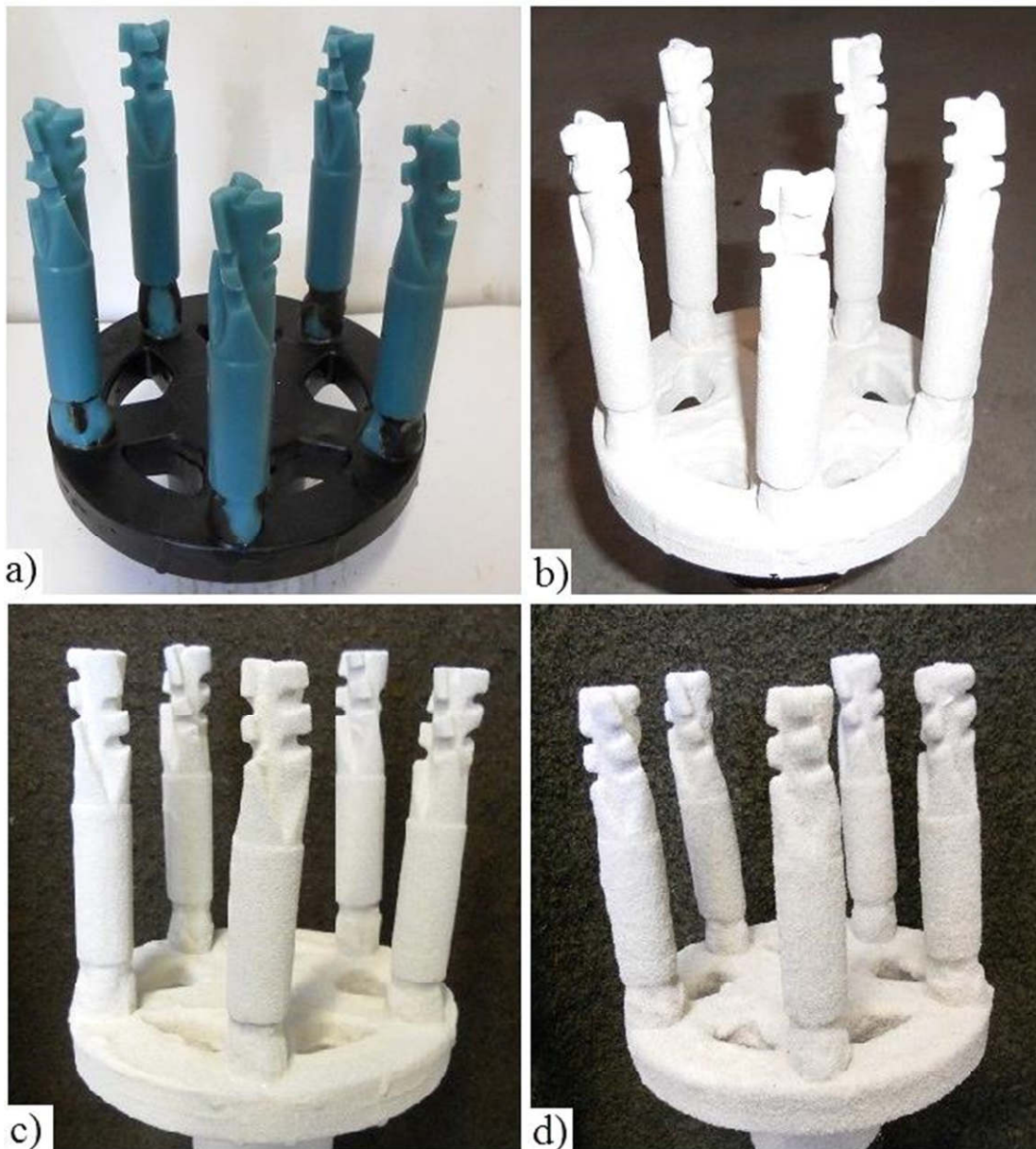


Obr. 9.13 Připravený licí stromeček připravený k obalování.

Formovací hmoty pro výrobu skořepinových forem se skládají z **plniva** a **pojiva**. Plniva jsou složeny vždy z práškovité žáruvzdorné hmoty (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2) a z vazné kapaliny. Pojiva spolu s žáruvzdorným materiálem tvoří vlastní obalovou hmotu, nesmí snižovat žáruvzdornost formy a musí být netečné při vypalování formy k žáruvzdornému materiálu i k roztavenému kovu. Dále musí po ztuhnutí být dostatečně pevné, jak po vysušení, tak i po vypálení. Jako pojiva se používají především koloidní roztoky oxidu křemičitého (SiO_2). Obalování připraveného stromečku spočívá v opakovaném namáčení do obalové hmoty, posypávání žáruvzdorným materiálem o vhodné zrnitosti a sušení jednotlivých obalů. Tento proces (obr. 9.14) se opakuje tolikrát, dokud není dosaženo požadované tloušťky formy (počet vrstev se pohybuje od pěti až patnácti dle požadované pevnosti formy) [78,79].

Při **namáčení** se licí stromeček pozvolna ponořuje do obalové hmoty (keramické břečky) při současném otáčení a naklánění tak, aby bylo dosaženo rovnoměrné tloušťky nanášené obalové hmoty. **Posypávání** žáruvzdorným materiálem je provedeno ponořením do vzduchem načeřeného posypového materiálu. Na první posyp

se používají materiály s jemnější zrnitostí (0,1 až 0,25)mm, aby bylo dosaženo požadované kvality a rozměrové přesnosti budoucího odlitku. Na další posypy se používají materiály se zrnitostí (0,25 až 0,5)mm. Po každém namáčení a posypání dochází k tuhnutí a sušení na vzduchu nebo působením plynného činidla [78,79].



Obr. 9.14 Postup výroby skořepinové formy.

Poznámka: Pro výrobu skořepinové formy byla zvolena společnost SPO s.r.o. [77] se sídlem ve Zlíně. Po namočení do keramické břechky, která je složena z vazné kapaliny a jemně mletého písku Kvarcit, byl licí stomeček posypán prvním obalem (písek Kerimpex, sušení 1 hodina). Dále následoval posyp pískem s hrubším zrnem (ST01/06, sušení 6 hodin). Poslední tři obaly byly provedeny do hrubozrnného písku (ST 06/12, sušení mezi každým obalem bylo 6 hodin). Chemické složení, mechanické vlastnosti a velikost zrn použitých slévarenských písků jsou uvedeny v příloze 4.

Až má forma požadovanou tloušťku, dochází k **vytavování** modelové hmoty. Vytavování se provádí za vysoké teploty (vložením do pece o teplotě min. 750°C s následným žíháním (např. ve vroucí vodě, v autoklávu nebo dielektrickým ohřevem. Při vytavování voskového modelu je důležité, aby se vytvořila dilatační spára (vrstva tekutého vosku na hranici forma-voskový model), která umožní modelu volně dilatovat bez porušení souvislosti skořepiny (bez vzniku trhlin) [78,79].

Takto připravenou skořepinovou formu je nutné před samotným odléváním kovu **žihat** (900 až 1000°C), aby forma mohla odolávat vysokým teplotám. Dále dojde k odstranění možných zbytků voskového materiálu, zpevnění formy a k jejímu předehřátí před litím na stanovenou teplotu [79]. Připravené silikonová forma je zobrazena na obr. 9.15.



Obr. 9.15 Připravená skořepinová forma.

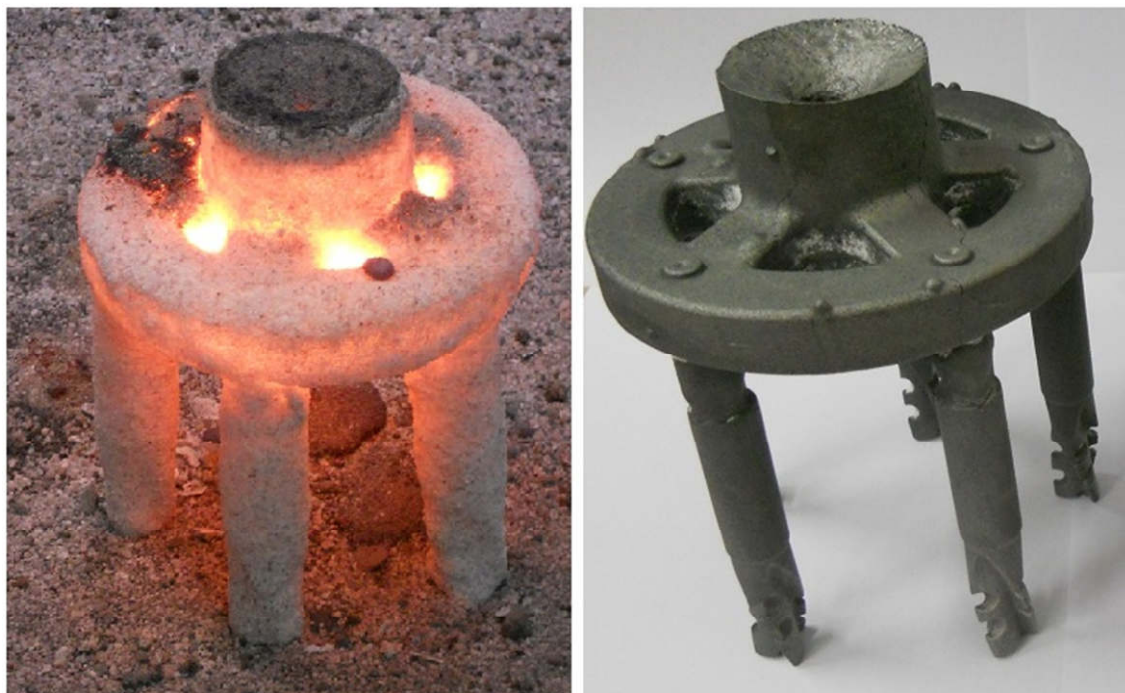
9.5 Kovový prototyp

Do takto připravené skořepinové formy byly odlity prototypy frézovacích nástrojů s kompenzačními břity. Odlití nástrojů proběhlo ve společnosti SPO s.r.o. [77], která odlévá nástroje z lité oceli HSSE o tvrdosti 63-67 HRC pro společnost ZPS – Frézovací nástroje a.s. [46]. Při samotném odlévání se počítá s 10-15% zmetkovitostí. Chemické složení použité rychlořezné oceli je znázorněno v tab. 9.3.

Tab. 9.3 Chemické složení HSSE lité oceli podle PN 422993 [47].

Chemické složení	C [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	W [%]
PN 422993	1,15	4,10	3,10	3,10	6,50

Po zchlazení odlitého kovu dojde k rozbití skořepiny a k následnému oddělení jednotlivých nástrojů od vtokové soustavy. Průběh výroby kovových prototypů je znázorněn na obr. 9.16 a 9.17.



Obr. 9.16 Odlévání kovových prototypů.



Obr. 9.17 Odlité nástroje po odstranění vtokové soustavy.

Poznámka: Původní rozměr navrženého prototypu frézovacího nástroje byl Ø20-106mm (stopka nástroje Ø20mm). Z toho důvodu, že při chladnutí odlitého kovu ve skořepinové formě došlo ke většímu smrštění, než které bylo uvažováno, bylo rozhodnuto, že nástroj bude obroben (soustružen a broušen) na Ø18,45-96mm, z důvodu upnutí nástroje do upínače (stopka nástroje Ø16mm). Zmenšení průměru nástroje po odlití kovových prototypů lze přičíst i samotné výrobě silikonové formy (kap. 9.2) a následnému odlévání voskových modelů (kap. 9.3). Jak již bylo zmíněno výše, při odlévání voskových modelů docházelo k vytékání vosku mimo silikonovou formu, která byla sestavena pouze pomocí kancelářských spon. Z toho důvodu byla forma stáhnuta pomocí zámečnické svorky (obr. 9.9), aby bylo zabráněno nežádoucímu úniku vosku (průřez nástroje se změnil z kružnice na „elipsu“).

9.6 Dokončovací operace

Nejprve bylo nutné odlité prototypy žíhat na měkko, aby došlo ke zlepšení obrobitelnosti materiálu (přeměna lamelárního cementitu na globulární). Pomalý ohřev na teplotu 870°C (cca 7h) v peci HV 60/15, výdrž na této teplotě (cca 25h) a následné pomalé ochlazování v peci (cca 19h). Celý žíhací cyklus trval 51 hodin a je znázorněn v příloze 6.

Po skončeném žíhání byl nástroj soustružen (upínací i řezná část) s ponechaným přídatkem na dokončovací operaci – broušení. Aby bylo možné nástroj upnout mezi hroty, bylo nutné navrtat středící důlek do již předlitých břitů nástroje, z toho důvodu není žádný břit nástroje ostřen přes střed. Po provedených hrubovacích operacích následovalo kalení. Stupňovitý ohřev na kalící teplotu 1180°C, výdrž v minutách a následné rychlé ochlazení na proudícím vzduchu. Aby bylo dosaženo sekundární tvrdosti (kap. 3.4), bylo nutné nechat nástroj 3x popustit. Ohřev na teplotu 540°C, výdrž na této teplotě (1,5h) a následné pomalé ochlazení na vzduchu. Výsledná tvrdost nástroje se pohybuje v rozmezí 63-67HRC.

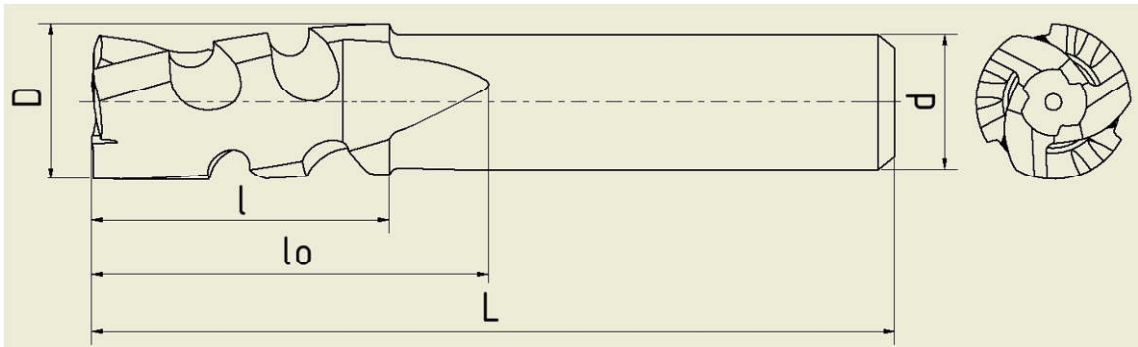
Tab. 9.4 Konečné parametry prototypu frézovacího nástroje s kompenzačními břitů.

Popis	Označení	Hodnota	Jednotka
Počet zubů	z	3	-
Průměr nástroje	D	18,45	mm
Úhel sklonu šroubovice	λ_s	17	°
Ortogonální úhel čela	γ_0	7	°
Délka nástroje	L	96	mm
Délka řezné části	l	36	mm
Délka řezné části s výběhem	l_0	48	mm

Po provedeném tepelném zpracování byla broušena stopka na Ø16h6, poslední operací bylo broušení hřbetních a čelních ploch nástroje na CNC brusce Walter. Pomocné schéma, které posloužilo pro výbrus funkčních částí nástroje, je zobrazeno v příloze 5. Proběhlé technologické operace byly provedeny ve strojovém parku společnosti ZPS-Frézovací nástroje a.s. [88].

Parametry prototypu frézovacího nástroje jsou zobrazeny v tab. 9.4 a na obr. 9.18, dokončený prototyp nástroje je zobrazen na obr. 9.19. Poslední operací byla depozice tvrdých tenkých PVD vrstev.

Poznámka: Žíhání na měkko bylo provedeno ve společnosti SPO s.r.o. [77], všechny ostatní operace proběhly ve společnosti ZPS-Frézovací nástroje a.s. [46]. Byly vybrány tři typy PVD povlaků – (Al,Ti)N, (Al,Ti,Cr)N a nanokompozitní povlak nACo®, které byly nanášeny ve společnosti Liss a.s. [41].



Obr. 9.18 Schéma prototypu frézovacího nástroje s kompenzačními bříty.

Poznámka: V dalších kapitolách je nový prototyp frézovacího nástroje s kompenzačními bříty označován jako „RMC“ (Roughing Milling Cutter = hrubovací frézovací nástroj).



Obr. 9.19 Dokončený prototyp frézovacího nástroje RMC.

10 OBROBITELNOST RŮZNORODÝCH MATERIÁLŮ

V této kapitole je popsán experiment, který posloužil pro výběr vhodného obráběného materiálu a vhodné technologie pro dlouhodobé testování nově navržené geometrie čelní stopkové válcové frézy RMC. Monitorovaným parametrem bylo silové zatížení při sousledném a nesousledném frézování různorodých materiálů. Pro porovnání získaných výsledků byla zvolena tříbřitá čelní válcová stopková fréza od společnosti ZPS – Frézovací nástroje.

10.1 Obráběné materiály

Bylo vybráno pět různorodých materiálů, do kterých byl vždy proveden jeden průjezd sousledně a jeden nesousledně. Obráběné materiály byly vybírány na základě pevnostních charakteristik od nejměkčího po nejtvrdí a na základě obrobitelnosti materiálu. Prvním obráběným materiálem bylo umělé dřevo SikaBlock M450 na bázi polyuretanu o rozměrech 100x75-150mm. Dále byla obráběna hliníková slitina AlCu4MgSi o rozměrech 63x25-80mm (chemické složení viz tab. 8.1). Jako třetí obráběný materiál byla zvolena slitina AlSi9Cu3(Fe) o rozměrech 83x40-80mm s dobrou obrobitelností, využívaná především v automobilovém průmyslu, jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 10.1.

Tab. 10.1 Chemické složení siluminu AlSi9Cu3(Fe) [83].

Ch. sl.	Al [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Fe [%]	Zn [%]	Ni [%]	Sn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Pb [%]
	zbytek	8,0	2,0	0,15	0,55	0,6	1,2	0,55	0,15	0,15	0,2	0,35
		-	-	-		-						
		11,0	4,0	0,55		1,1						

Dalším obráběným materiálem byla zvolena nelegovaná ušlechtilá konstrukční ocel C45E (1.1191, ČSN 41 2050) o rozměrech 66x26-76mm jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 10.2.

Tab. 10.2 Chemické složení oceli ČSN 41 2050 [84].

Chemické složení	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]
	0,40	max.	0,46	max.	max.	max.	max.	max.
	-	0,43	-	0,035	0,035	0,40	0,10	0,40
	0,52		0,84					

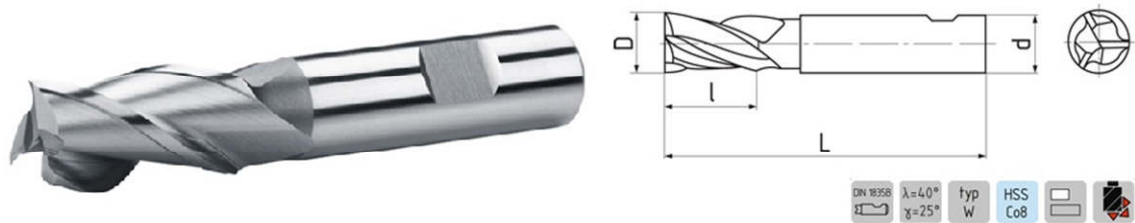
Posledním obráběným materiálem byla zvolena nízkolegovaná chrom-molybdenová ocel 42CrMoS4 (1.7227, ČSN 41 5142). Jedná se o ocel s vyšší prokalitelností, která se nejčastěji používá pro výše namáhané strojní součásti. Chemické složení obráběné oceli o rozměrech 66x26-76mm je uvedeno v tab. 10.3.

Tab. 10.3 Chemické složení oceli ČSN 41 5142 [85].

Chemické složení	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
	0,36	max.	0,56	max.	max.	0,85	0,12
	-	0,43	-	0,03	0,04	-	-
	0,47		0,94			1,25	0,33

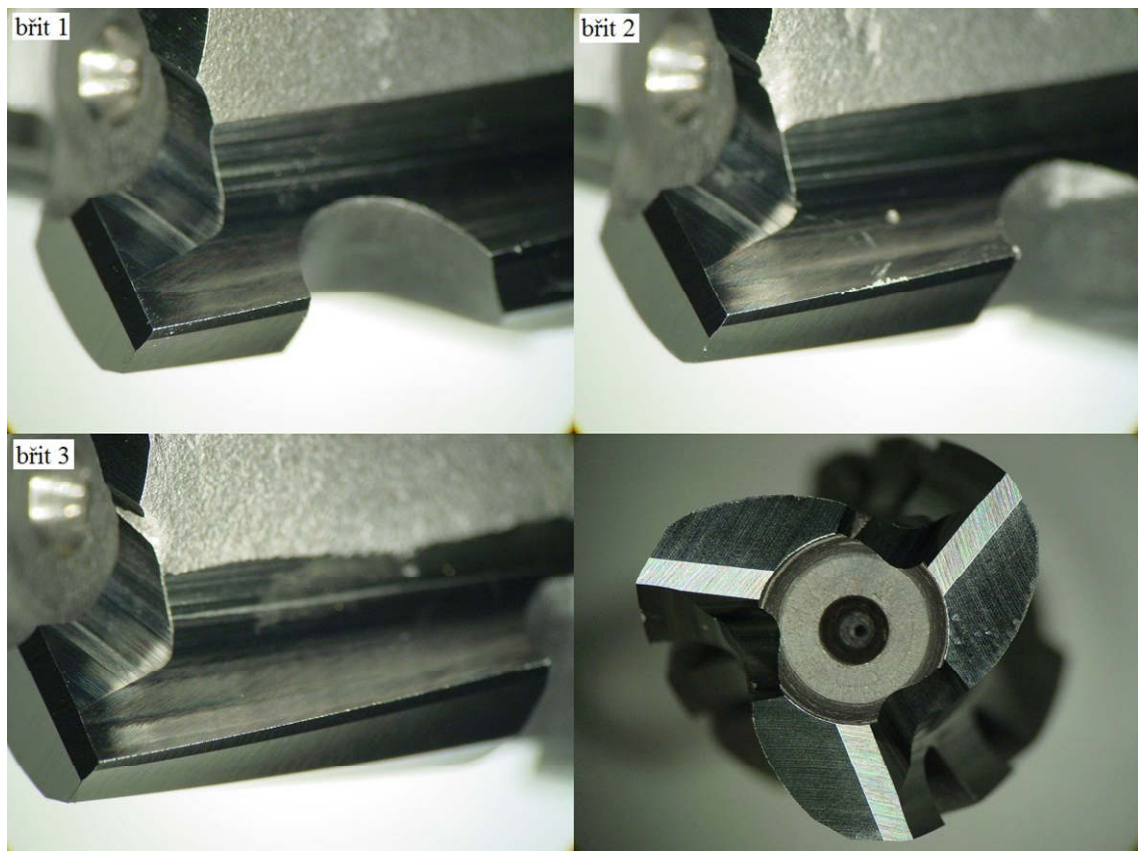
10.2 Obráběcí nástroje

Pro sousledné a nesousledné frézování obráběných materiálů byla použita nepovlakovaná fréza RMC (obr. 9.19), jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 9.3. Pro porovnání naměřených výsledků byla zvolena také tříbřitá nepovlakovaná fréza $\varnothing 18-92\text{mm}$ od společnosti ZPS – Frézovací nástroje (obr. 10.1), s jedním břitem ostřeným přes střed.

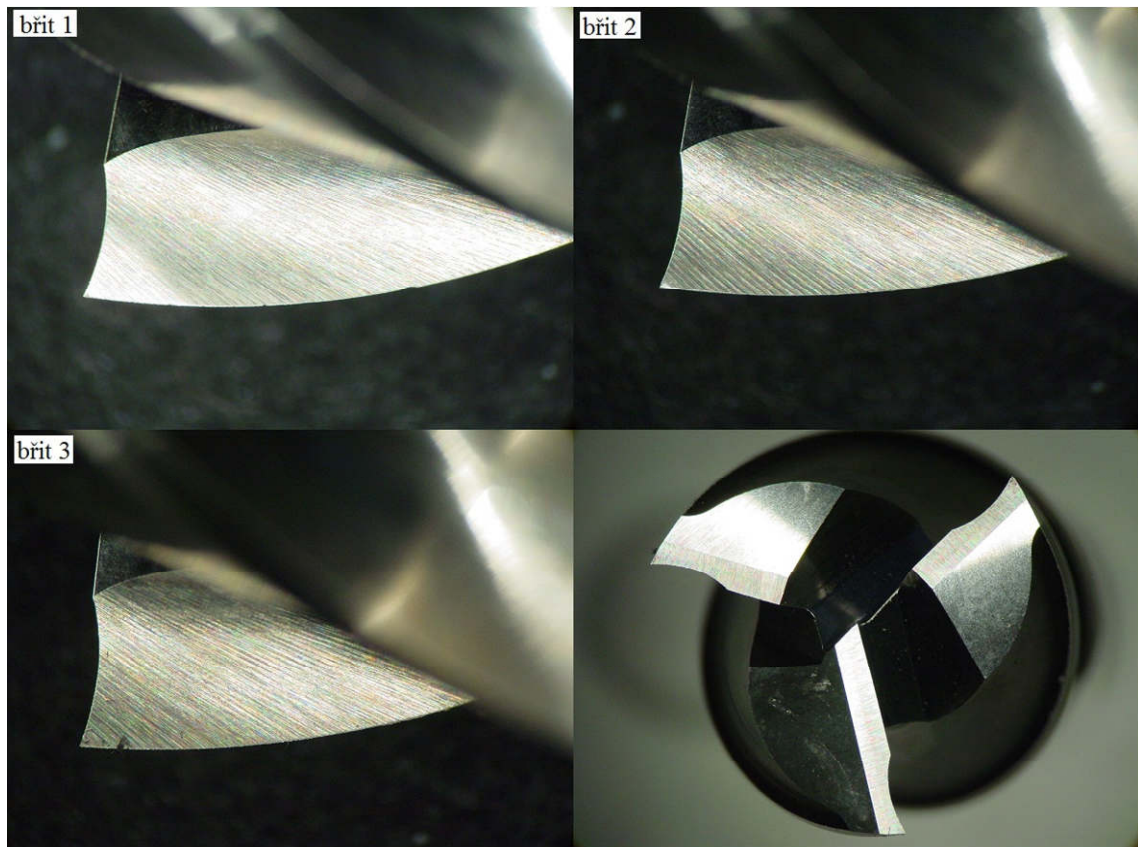


Obr. 10.1 Válcová čelní fréza $\varnothing 18-92\text{mm}$, 1 břit přes střed; HSS Co8 [48].

Na obr. 10.2 a 10.3 jsou zobrazeny detaily jednotlivých břitů obou testovaných řezných nástrojů před provedenými řeznými testy. Z obrázků je patrné, že s novým nástrojem se není možné tzv. „zavrtat“, jelikož není žádný ze tří břitů ostřen přes střed. Důvody, proč není jeden břit ostřen přes střed, jsou popsány v kap. 9.5. Naopak katalogový nástroj je ostřen přes střed, tudíž je zavrtání možné a je vyroben z HSS oceli s přísadou 8% Co (HSS Co8), jejíž chemické složení je popsáno v tab. 7.1 (kap. 7.2). Oba testované nástroje jsou opatřeny ploškou pro upínače typu weldon.



Obr. 10.2 Detaily jednotlivých břitů tříbřitého frézovacího nástroje RMC.



Obr. 10.3 Detaily jednotlivých břitů tříbřitého frézovacího nástroje od společnosti ZPS – Frézovací nástroje, jeden břit ostřen přes střed, HSS Co8.

Poznámka: V dalších kapitolách bude katalogový nástroj od společnosti ZPS - Frézovací nástroje a.s., se sídlem ve Zlíně, obecně označován jako název společnosti, tedy „ZPS“.

10.3 Obráběcí stroj

Testování probíhalo na vertikální frézce FB 32V, která je součástí strojového parku ÚST FSI VUT v Brně, která je určena pro přesné obrábění v kusové i malosériové výrobě. Rozsah otáček vřetene umožňuje hospodárné využití nástrojů z rychlořezných ocelí, tak i ze slinutých karbidů. Pracovní stůl frézky s upnutým obrobkem je možné přestavit rychloposuv ve všech třech směrech. Všechny důležité funkce jsou řízeny dálkově pomocí ovládání na závěsné desce [86].

Technické parametry stroje [86]:

Vnější rozměr stolu	450x1400 mm
Otáčky vřetene	28-1400 min ⁻¹
Podélný a příčný posuv	10-2000 mm/min
Svislý posuv	2,5-500 mm/min

10.4 Řezné podmínky

Pro všech pět obráběných materiálů byl vždy proveden jeden průjezd sousledně a jeden nesousledně oběma testovanými nástroji. Frézování umělého dřeva SikaBlock M450 i obou hliníkových slitin probíhalo na sucho, tzn. bez použití procesní kapaliny. Nastavené řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 10.4 až 10.8.

Tab. 10.4 Nastavené řezné podmínky pro obrábění umělého dřeva SikaBlock M450.

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	80	m/min
Otáčky	n	1400	1/min
Posuvová rychlost	v_f	200	mm/min
Posuv na zub	f_z	0,0476	mm
Šířka záběru ostří	a_p	24	mm
Radiální šířka záběru	a_e	9	mm

Tab. 10.5 Nastavené řezné podmínky pro obrábění hliníkové slitiny AlCu4MgSi.

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	80	m/min
Otáčky	n	1400	1/min
Posuvová rychlost	v_f	200	mm/min
Posuv na zub	f_z	0,0476	mm
Šířka záběru ostří	a_p	24	mm
Radiální šířka záběru	a_e	2	mm

Tab. 10.6 Nastavené řezné podmínky pro obrábění hliníkové slitiny AlSi9Cu3(Fe).

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	80	m/min
Otáčky	n	1400	1/min
Posuvová rychlost	v_f	200	mm/min
Posuv na zub	f_z	0,0476	mm
Šířka záběru ostří	a_p	24	mm
Radiální šířka záběru	a_e	2	mm

Pro frézování ocelí 12 050 a 15 142 byla použita procesní kapalina, složená z koncentrátu CIMSTAR 597 a vody v poměru 5:100.

Tab. 10.7 Nastavené řezné podmínky pro obrábění oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).

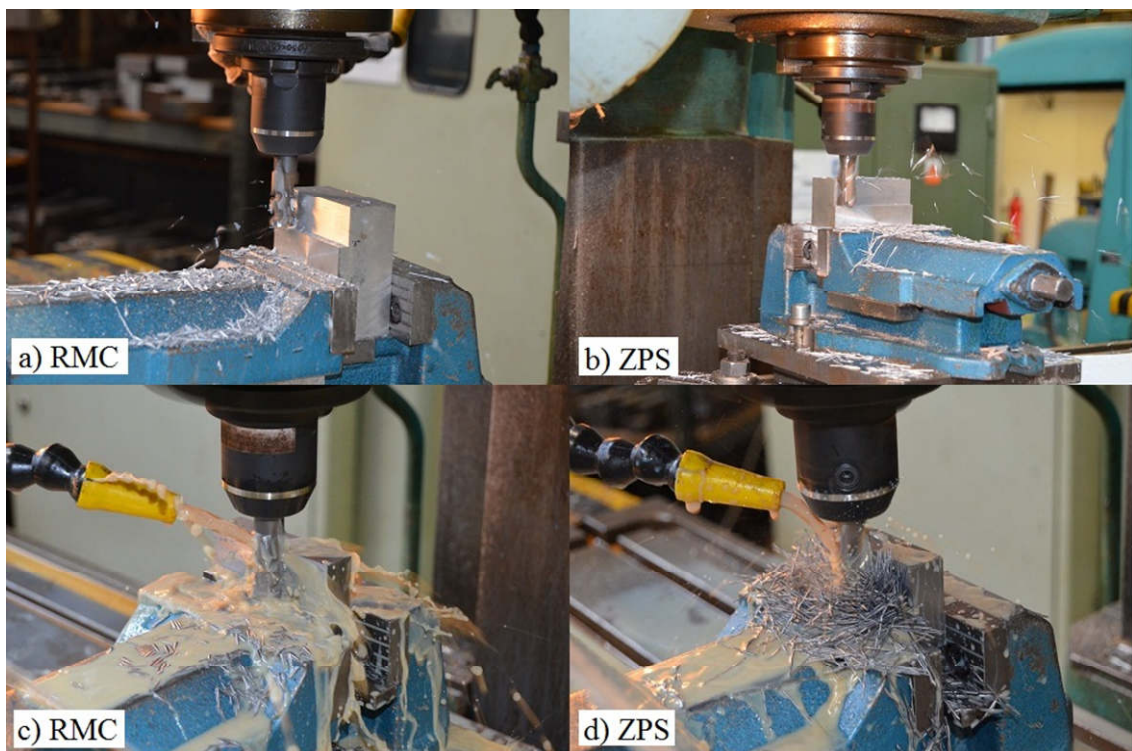
Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	50	m/min
Otáčky	n	900	1/min
Posuvová rychlost	v_f	125	mm/min
Posuv na zub	f_z	0,0463	mm
Šířka záběru ostří	a_p	24	mm
Radiální šířka záběru	a_e	2	mm

Tab. 10.8 Nastavené řezné podmínky pro obrábění oceli 42CrMoS4 (1.7227, ČSN 41 5142).

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	31,5	m/min
Otáčky	n	560	1/min
Posuvová rychlost	v_f	80	mm/min
Posuv na zub	f_z	0,0476	mm
Šířka záběru ostří	a_p	24	mm
Radiální šířka záběru	a_e	2	mm

10.5 Průběh experimentu

Experiment probíhal na vertikální frézce FB 32V, v jejímž vřetenu byla upnuta stopková fréza (RMC, ZPS), pomocí upínače typu weldon. Nejprve byl proveden jeden průjezd sousledně do umělého dřeva SikaBlock M450 novým nástrojem RMC, poté při stejných řezných podmínkách byl proveden stejný průjezd nástrojem ZPS. Pro obrábění obou hliníkových slitin i obou ocelí byly provedeny vždy i průjezdy nesousledně. Při frézování zvolených hliníkových slitin (obr. 10.4a a 10.4b) byly nastaveny stejné řezné podmínky (jako u M450), pouze došlo ke snížení radiální šířky záběru $a_e=2\text{mm}$.



Obr. 10.4 Průběh experimentu: a-b) obrábění slitiny AlCu4MgSi; c-d) obrábění oceli 12 050.

Pro frézování obou zvolených ocelí byly zvoleny nižší hodnoty otáček vřetene a posuvové rychlosti ($n=900$ (560) min^{-1} ; $v_f=125$ (80) mm/min), pouze šířka záběru hlavního ostří a radiální šířka záběru zůstaly stejné. Frézování probíhalo za pomoci procesní kapaliny (obr. 10.4c a 10.4d).

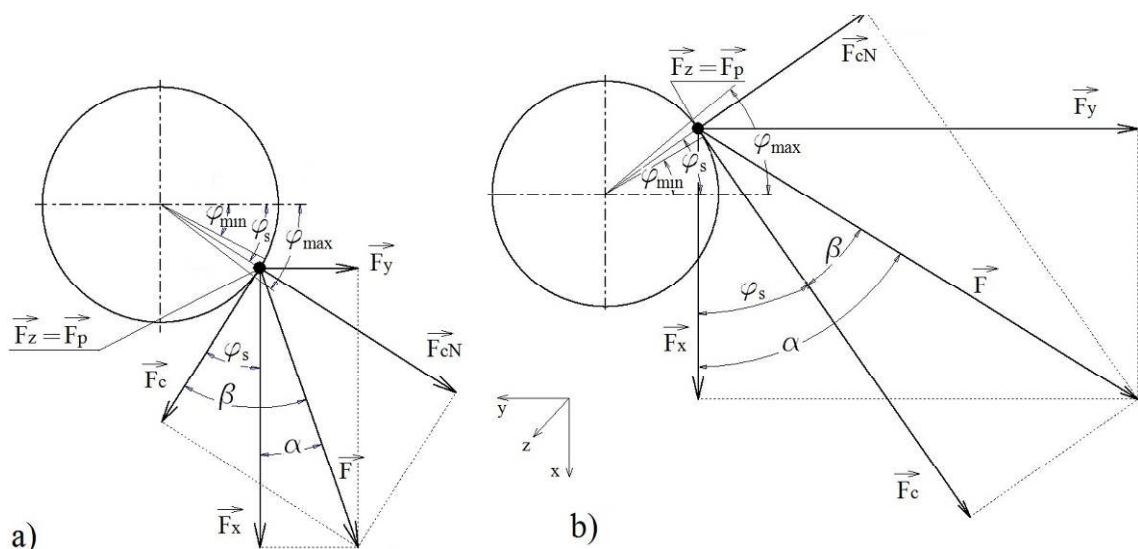
10.6 Analýza silového zatížení při frézování

Pro analýzu silového zatížení byl použit dynamometr KISTLER 9257B, vybavený nábojovými zesilovači KISTLER 9011A, o jejíž obsluhu se stará notebook s vyhodnocovacím softwarem Dynoware. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 1500 Hz. Zapojení celé aparatury je zobrazeno na obr. 10.5.



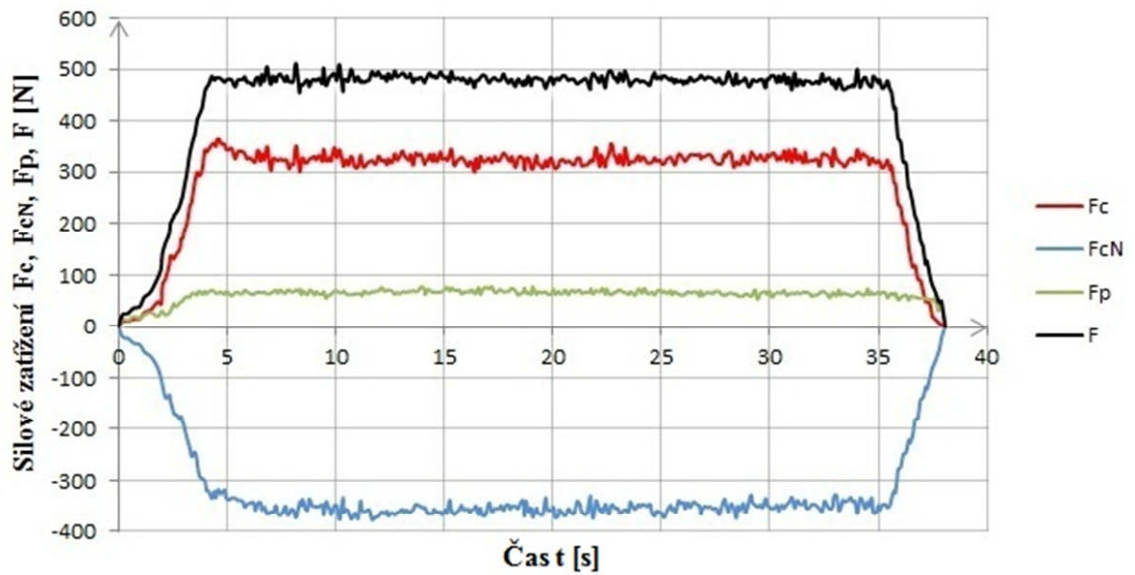
Obr. 10.5 Schéma měřicí aparatury Kistler.

Dynamometr snímá reakce vyvolané odebráním třísky řezným nástrojem v nastaveném měřeném průběhu frézování v kartézském souřadném systému (F_x , F_y , F_z), který je možno, v závislosti na úhlu natočení frézy, transformovat do jiného souřadného systému (F_c , F_{cN} , F_p). Rozložení silového zatížení při sousledném i nesousledném frézování je zobrazeno na obr. 10.6. Takto získané data byly převedeny do textového souboru (txt), z důvodu jejich profiltrování (pro maximální průřez třísky) v softwaru Matlab a vyhodnoceny v tabulkovém procesoru Excel. Z jednotlivých vyfiltrovaných složek byla spočítána celková síla F a její jednotlivé silové složky F_c - řezná síla, F_{cN} - normálová síla a F_p - pasivní síla, které jsou dále užity pro sestavení silového zatížení v závislosti na čase při nesousledném a sousledném frézování všech pěti různorodých materiálů.

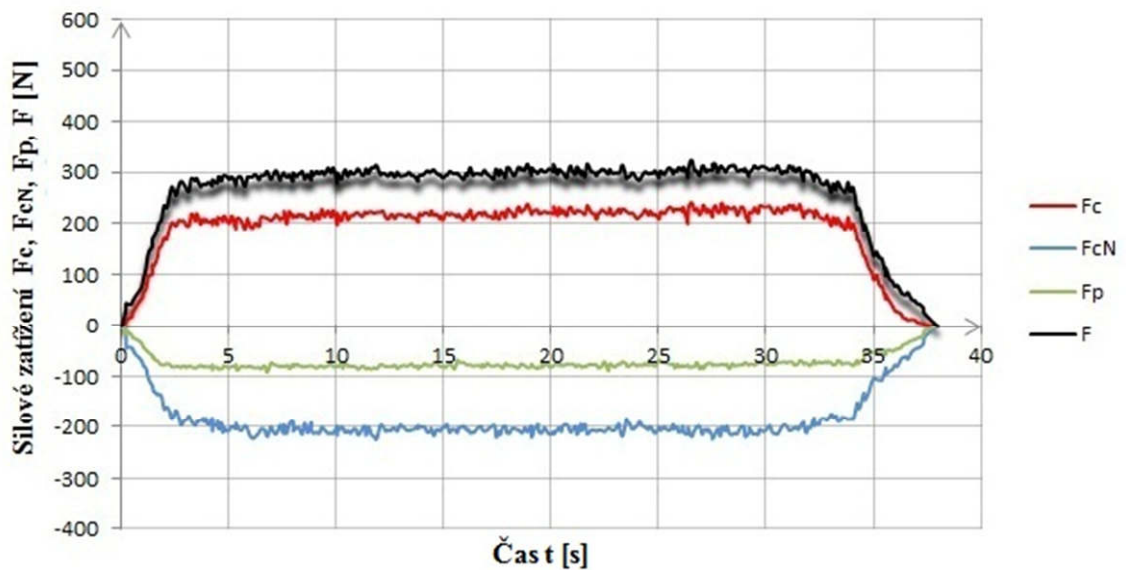


Obr. 10.6 Rozložení silového zatížení při frézování:
a) nesousledné; b) sousledné.

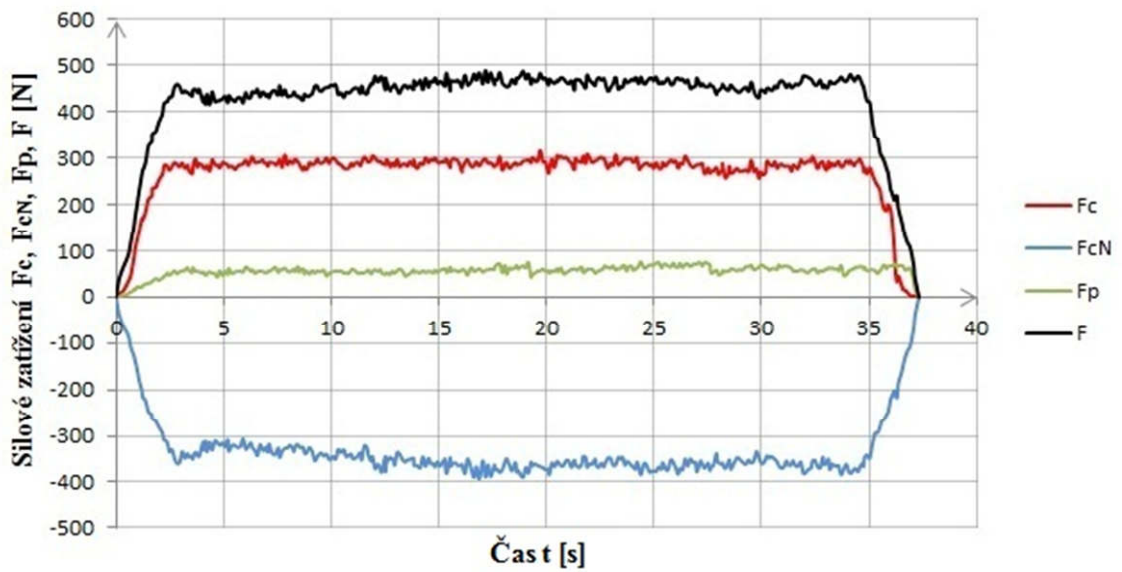
10.7 Průběhy silového zatížení při nesousledném frézování



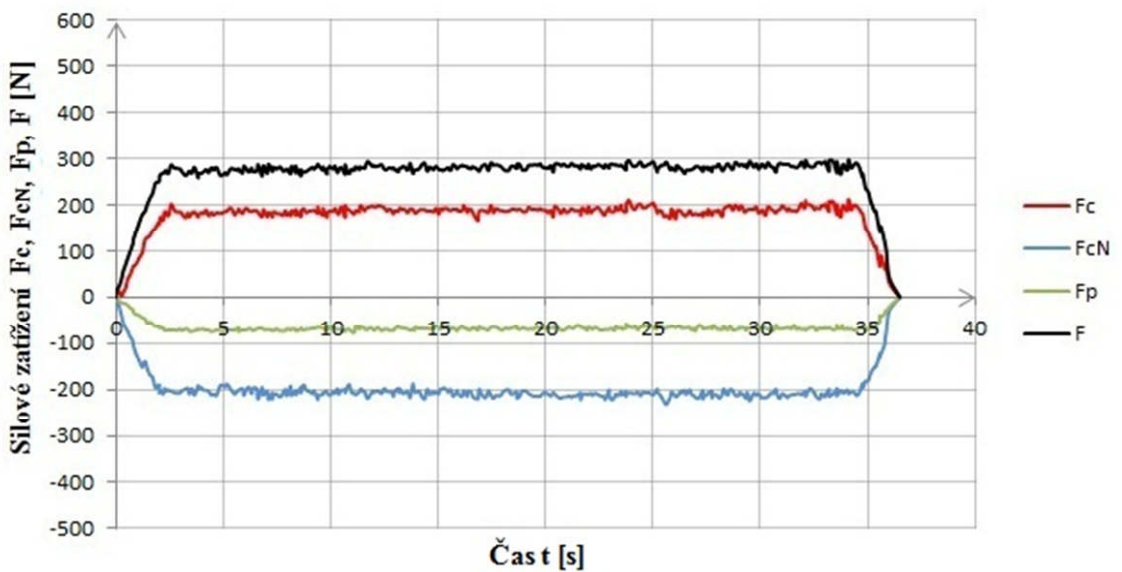
Obr. 10.7 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu RMC při nesousledném frézování hliníkové slitiny AlCu4MgSi.



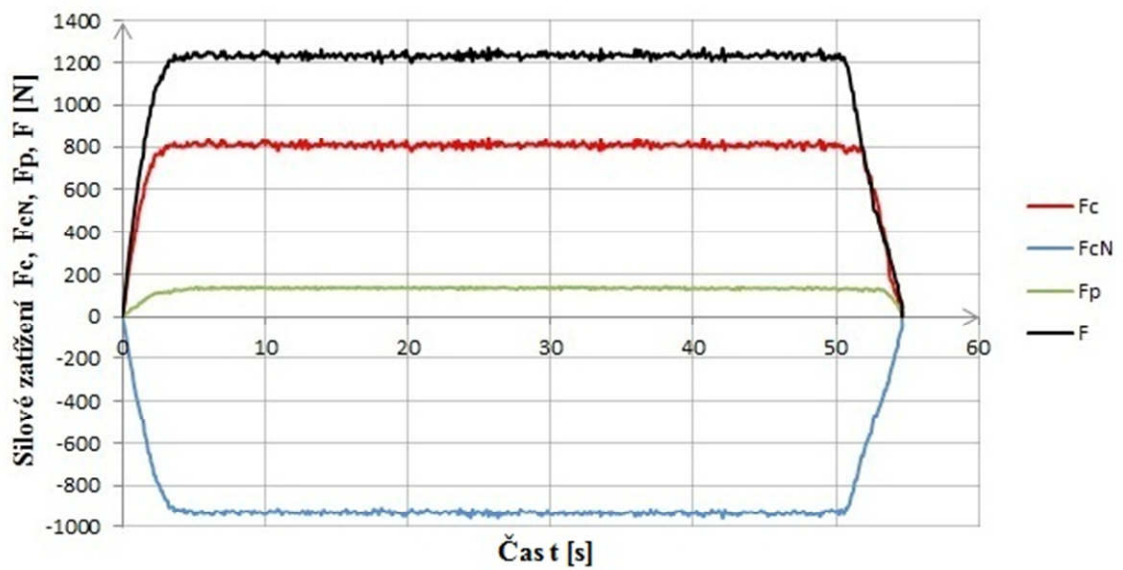
Obr. 10.8 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu ZPS při nesousledném frézování hliníkové slitiny AlCu4MgSi.



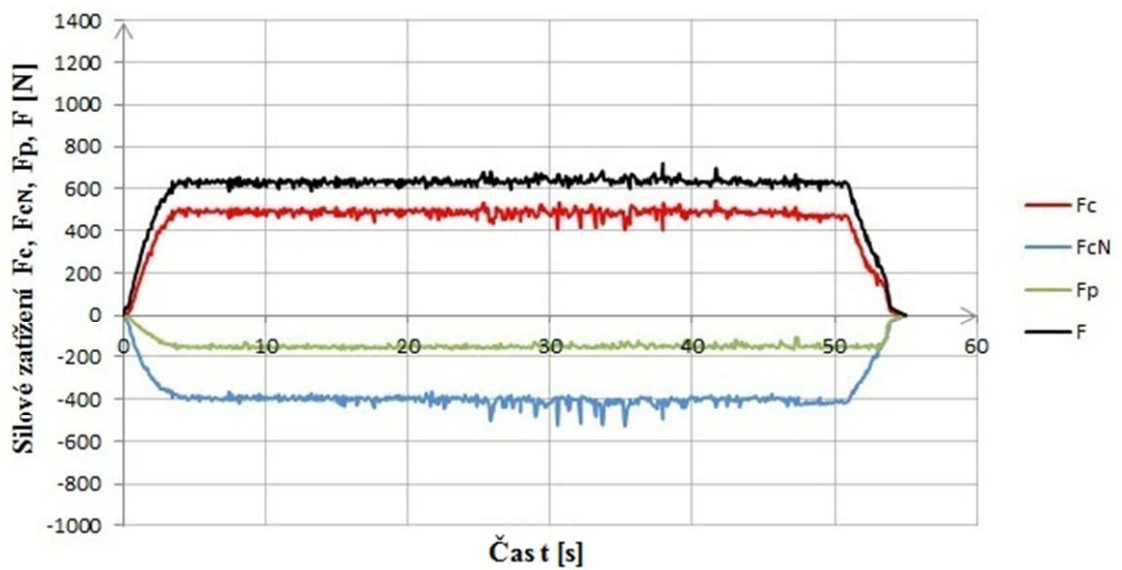
Obr. 10.9 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu RMC při nesousledném frézování hliníkové slitiny AlSi9Cu3(Fe).



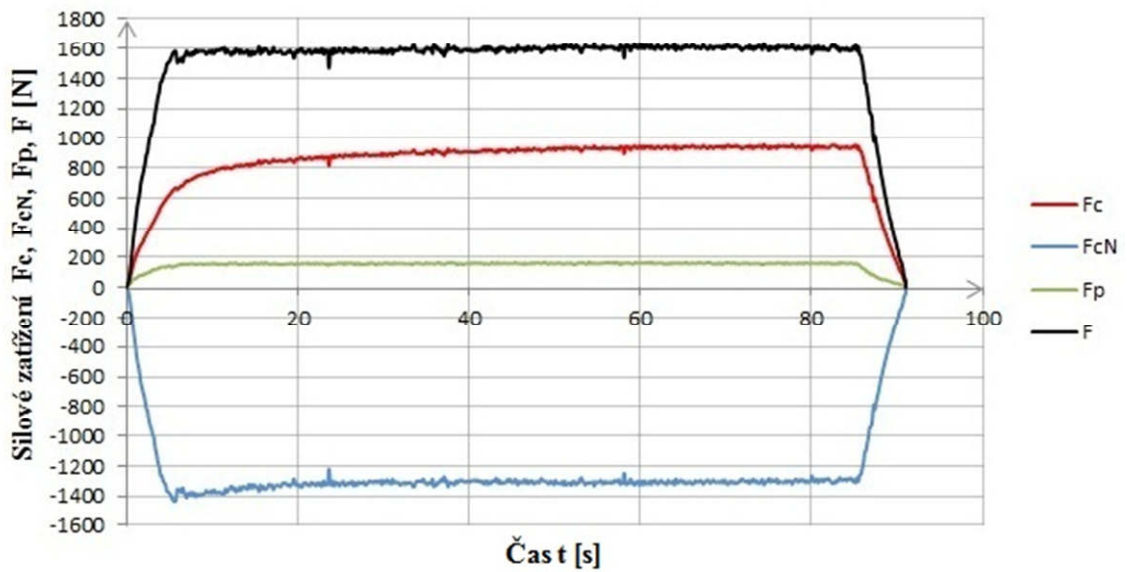
Obr. 10.10 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu ZPS při nesousledném frézování hliníkové slitiny AlSi9Cu3(Fe).



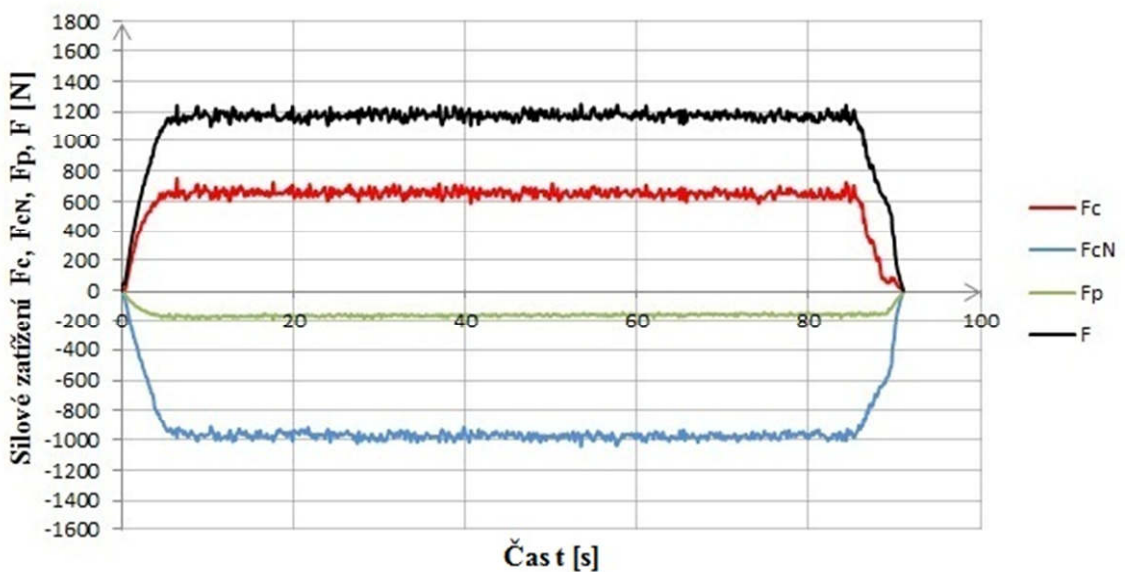
Obr. 10.11 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu RMC při nesousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



Obr. 10.12 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu ZPS při nesousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



Obr. 10.13 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu RMC při nesousledném frézování oceli 42CrMoS4 (1.7227, ČSN 41 5142).



Obr. 10.14 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu ZPS při nesousledném frézování oceli 42CrMoS4 (1.7227, ČSN 41 5142).

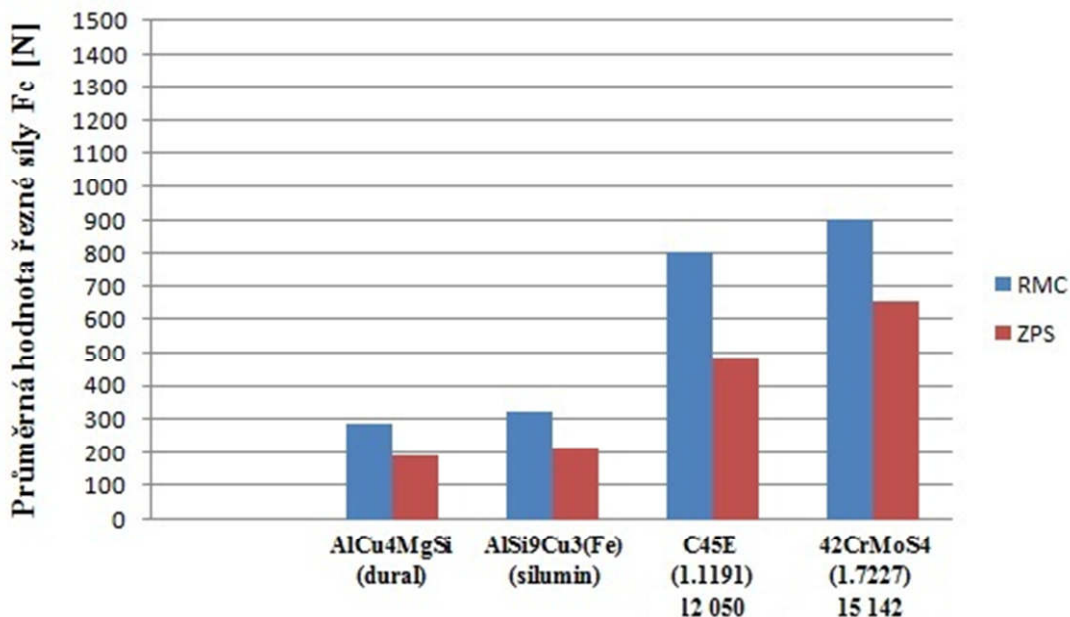
Na obr. 10.7 až 10.14 jsou znázorněny průběhy silového zatížení při nesousledném frézování vybraných materiálů za použití obou řezných nástrojů. Kladná hodnota

pasivní síly F_p je u nástroje RMC způsobena přetočenou šroubovicí, než jakou disponuje standardní katalogový nástroj ZPS.

U obou testovaných hliníkových slitin (obr. 10.7 - obr. 10.10) při nesousledném frézování bylo dosaženo přibližně stejných hodnot všech působících silových složek (F_c , F_{cN} , F_p) i celkové síly F . Celková síla nabyla průměrné hodnoty $F=500\text{N}$ za použití nástroje RMC, při použití katalogového nástroje ZPS dosáhla průměrné hodnoty 300N (pokles o cca 66,7%). Podobně řezná síla dosáhla hodnoty $F_c=300\text{N}$ (fréza RMC) a hodnoty $F_c=200\text{N}$ (fréza ZPS, pokles o 50%). Je možné také pozorovat stabilnější průběh silového zatížení, při použití nástroje ZPS, při nesousledném frézování obou testovaných hliníkových slitin.

Při frézování oceli 12 050 (obr. 10.11 - obr. 10.12) bylo dosaženo průměrných hodnot celkové síly $F=1200\text{N}$ a řezné síly $F_c=800\text{N}$ (pro frézu RMC) a hodnot $F=600\text{N}$ a $F_c=500\text{N}$ (pro frézu ZPS), kdy došlo k poklesu celkové síly F o 100% a řezné síly F_c o 60% právě při použití katalogového nástroje. Z průběhů silového zatížení je však možné pozorovat stabilnější průběh při použití nástroje RMC, navzdory vyššímu zatížení nástroje.

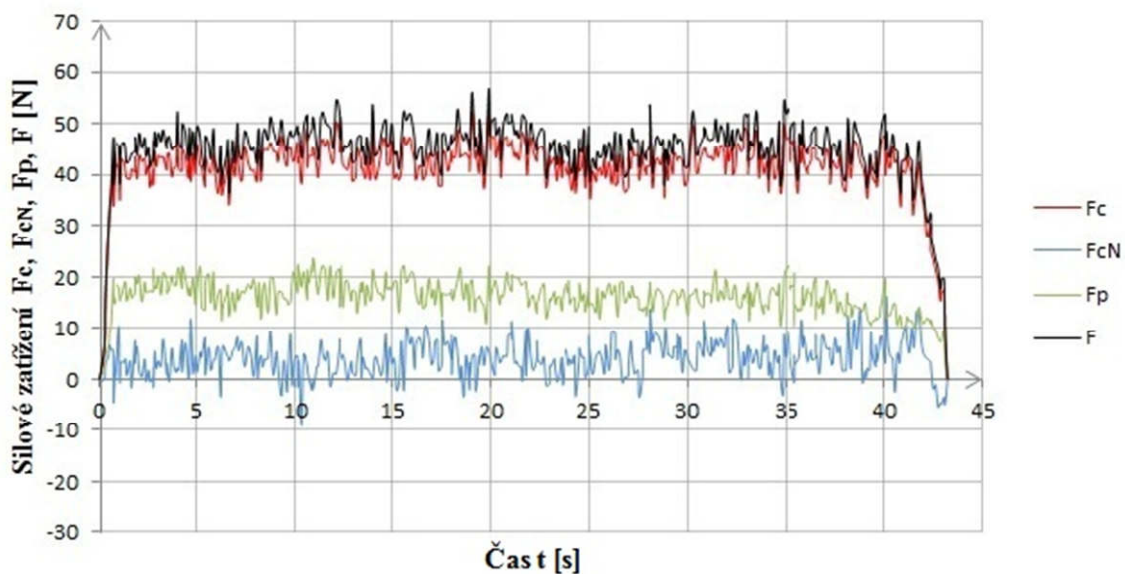
Při frézování oceli 15 142 (obr. 10.13 - obr. 10.14) bylo dosaženo průměrných hodnot celkové síly $F=1600\text{N}$ a řezné síly $F_c=900\text{N}$ (pro frézu RMC) a hodnot $F=1200\text{N}$ a $F_c=650\text{N}$ (pro frézu ZPS). Došlo k poklesu celkové síly F o cca 33,3% a řezné síly F_c o cca 38,5% při použití katalogového nástroje ZPS. Z průběhů silového zatížení je však opět možné pozorovat stabilnější průběh frézování při použití nástroje RMC.



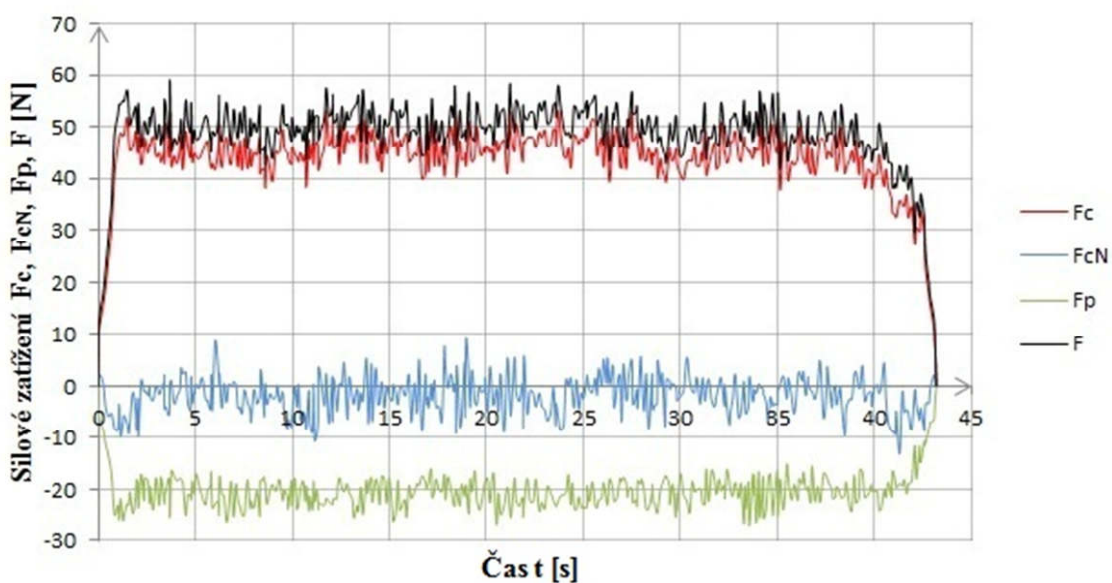
Obr. 10.15 Porovnání průměrných hodnot řezných sil při nesousledném frézování různorodých materiálů.

Poznámka: Na obr. 10.15 jsou znázorněny průměrné hodnoty řezné síly F_c při použití obou řezných nástrojů (RMC, ZPS) při frézování různorodých materiálů. Graf slouží pouze pro rychlé porovnání dosažené průměrné hodnoty řezné síly F_c pro oba testované nástroje, jelikož byly nastavené rozdílné řezné podmínky pro obráběné materiály.

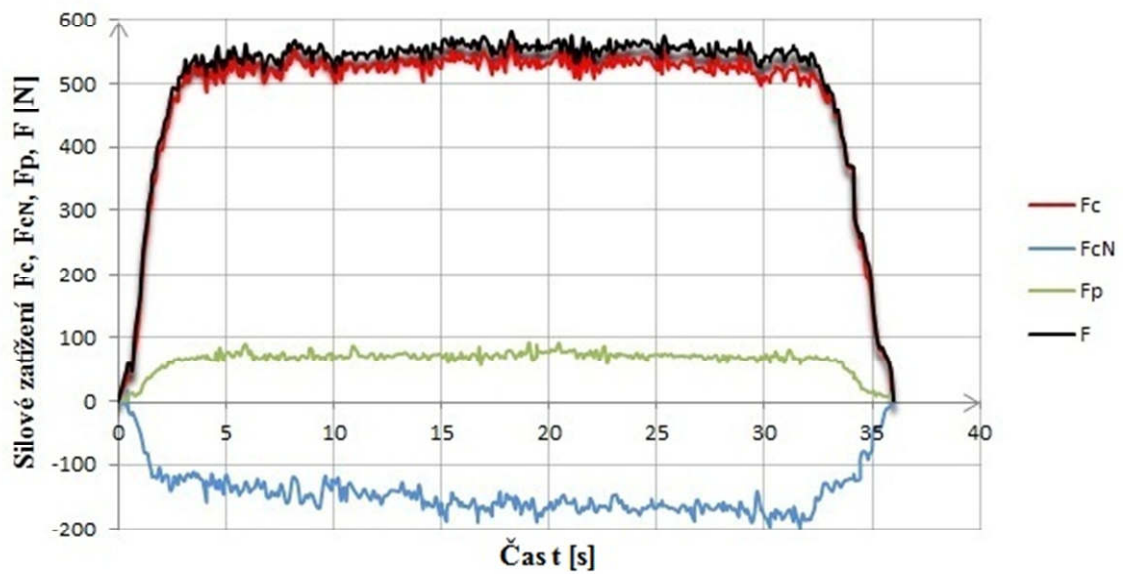
10.8 Průběhy silového zatížení při sousledném frézování



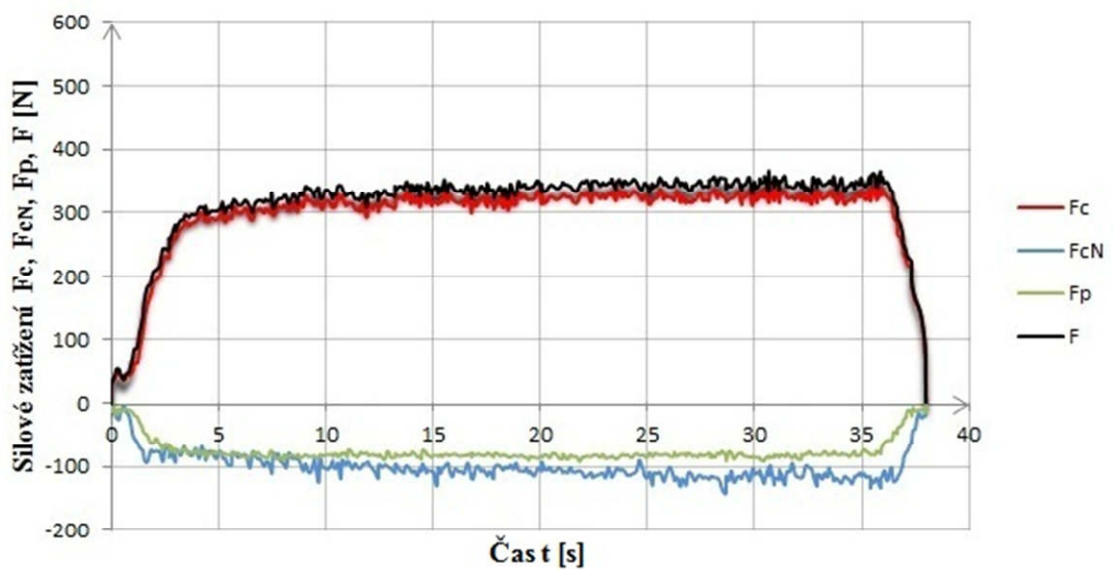
Obr. 10.16 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu RMC při sousledném frézování „umělého dřeva“ SikaBlock M450.



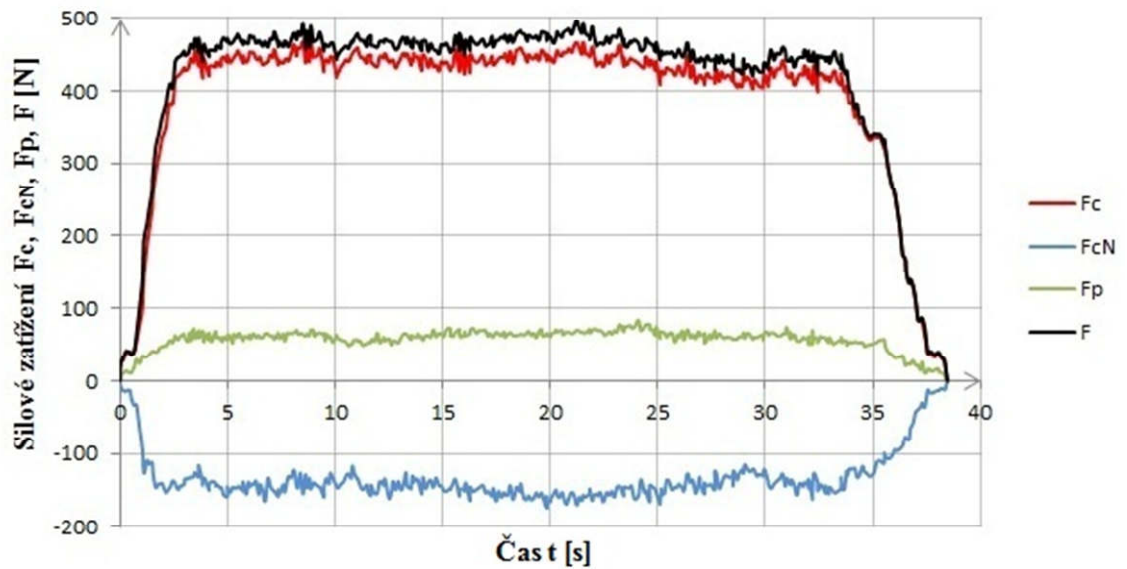
Obr. 10.17 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu ZPS při sousledném frézování „umělého dřeva“ SikaBlock M450.



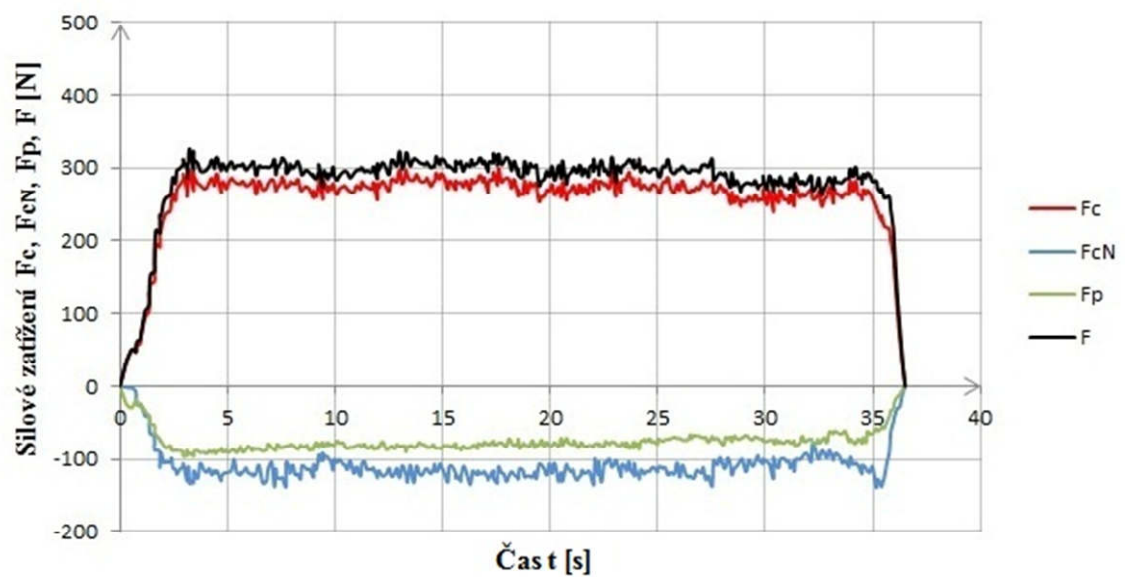
Obr. 10.18 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu RMC při sousledném frézování hliníkové slitiny AlCu4MgSi.



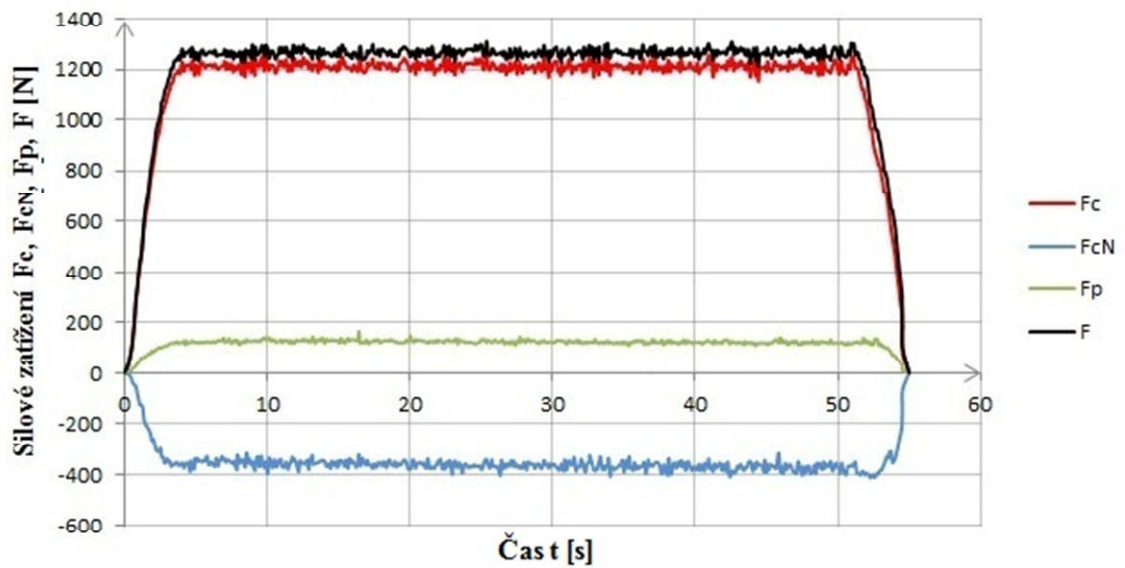
Obr. 10.19 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu ZPS při sousledném frézování hliníkové slitiny AlCu4MgSi.



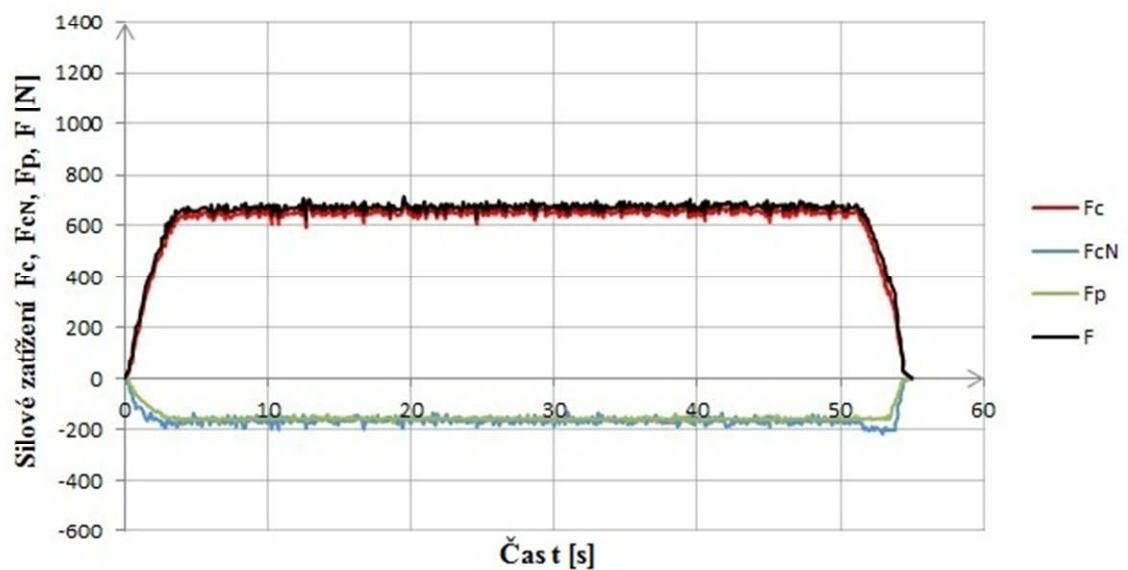
Obr. 10.20 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu RMC při sousledném frézování hliníkové slitiny AlSi9Cu3(Fe).



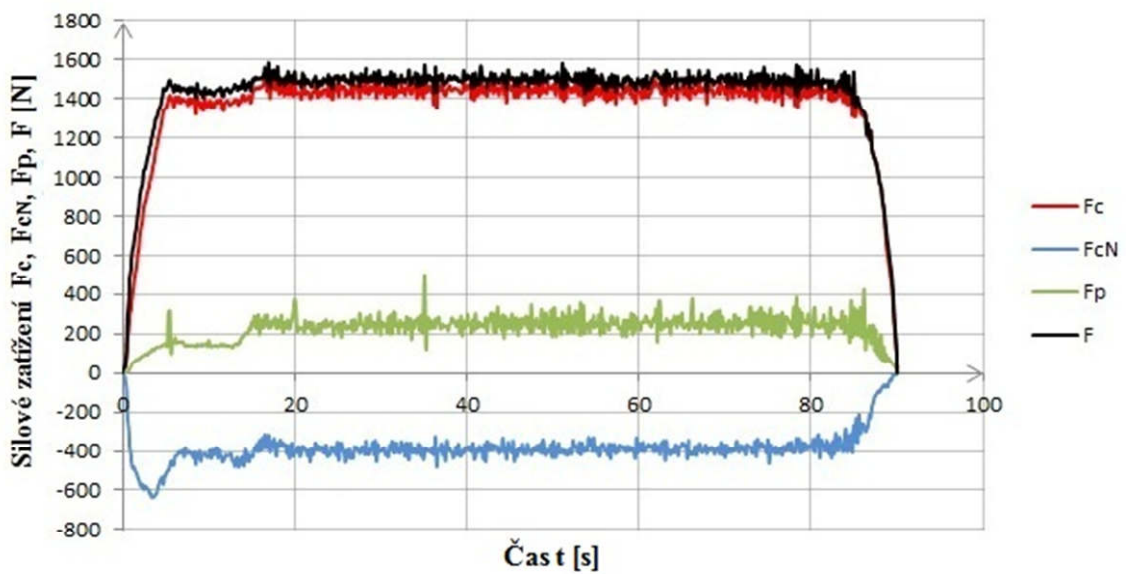
Obr. 10.21 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu ZPS při sousledném frézování hliníkové slitiny AlSi9Cu3(Fe).



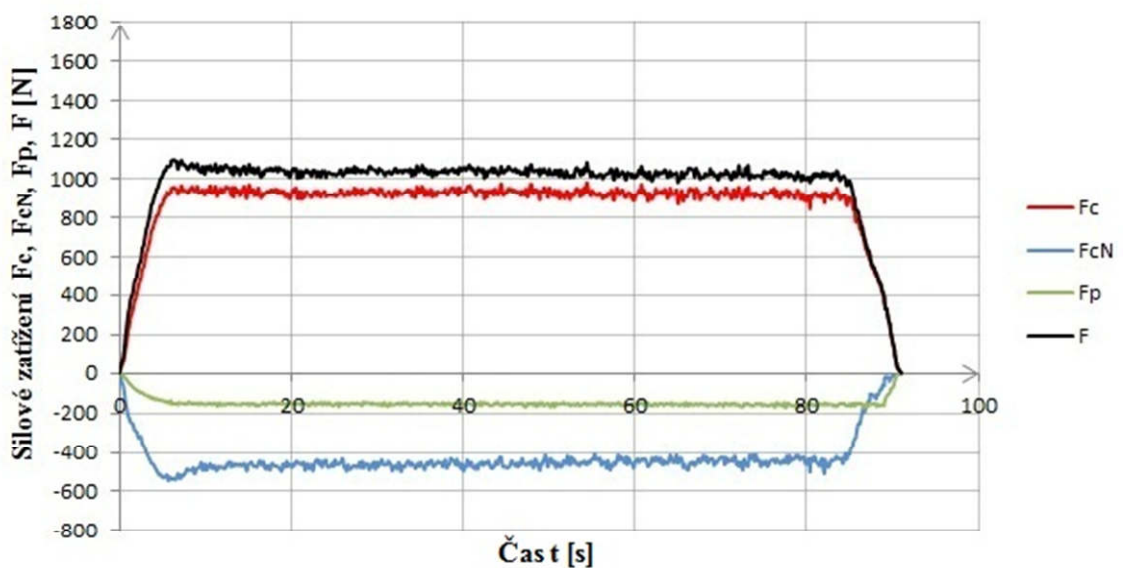
Obr. 10.22 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu RMC při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



Obr. 10.23 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu ZPS při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



Obr. 10.24 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu RMC při sousledném frézování oceli 42CrMoS4 (1.7227, ČSN 41 5142).



Obr. 10.25 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou stopkovou frézu ZPS při sousledném frézování oceli 42CrMoS4 (1.7227, ČSN 41 5142).

Na obr. 10.16 až 10.25 jsou znázorněny průběhy silového zatížení při sousledném frézování vybraných materiálů za použití obou řezných nástrojů. Kladná hodnota pasivní síly F_p je u nástroje RMC způsobena přetočenou šroubovicí, jako v případě frézování nesousledného při porovnání s nástrojem ZPS.

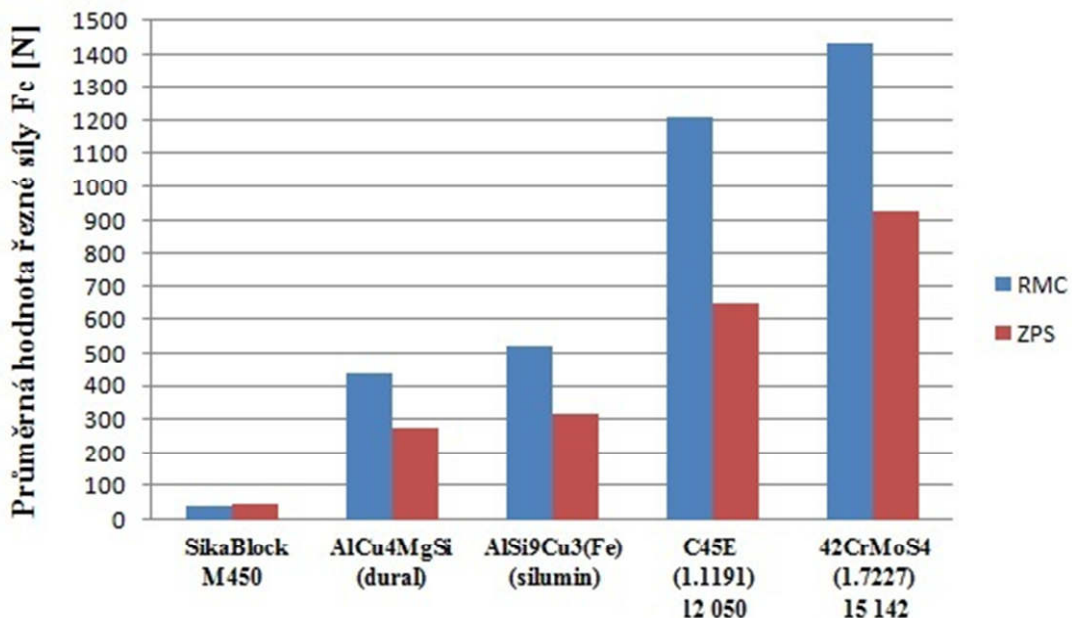
Při obrábění umělého dřeva SikaBlock M450 (obr. 10.16 - obr. 10.17) bylo dosaženo přibližně stejných průměrných hodnot celkové síly $F=50\text{N}$ a řezné síly $F_c=45\text{N}$ při použití obou testovaných nástrojů (rozdíl v dosažených hodnotách sil F a F_c byl cca 10%, přičemž nižších hodnot bylo dosaženo nástrojem RMC).

U obou obráběných hliníkových slitin bylo dosaženo při sousledném frézování rozdílných výsledků v porovnání s frézováním nesousledným (za stejných řezných podmínek). Dosažené průměrné hodnoty celkové síly F a řezné síly F_c při frézování slitiny AlCu4MgSi (obr. 10.18 – obr. 10.19) byly $F=550\text{N}$ a $F_c=520\text{N}$ (pro nástroj RMC) a $F=340\text{N}$ a $F_c=310\text{N}$ pro nástroj ZPS (pokles o cca 61,7% pro F a o cca 67,7% pro F_c).

Při frézování slitiny AlSi9Cu3(Fe) bylo dosaženo hodnot $F=470\text{N}$ a $F_c=440\text{N}$ (fréza RMC) a hodnot $F=300\text{N}$ a $F_c=270\text{N}$ (fréza ZPS). Došlo k poklesu celkové síly F (o cca 56,7%) a řezné síly F_c (o cca 63%) při použití katalogového nástroje ZPS v poměru k nástroji RMC. Z průběhů silového zatížení (obr. 10.20 - obr. 10.21) je možné pozorovat stabilnější průběh silového zatížení při použití obou testovaných nástrojů při frézování slitiny AlCu4MgSi v poměru s druhou obráběnou hliníkovou slitinou (siluminem).

Průměrné hodnoty celkové síly F a řezné síly F_c při frézování oceli 12 050 (obr. 10.22 - obr. 10.23) nabyly hodnot $F=1260\text{N}$ a $F_c=1200\text{N}$ (pro nástroj RMC) a hodnot $F=670\text{N}$ a $F_c=640\text{N}$ pro nástroj ZPS (pokles o cca 88% pro F a o 87,5% pro F_c). Oba použité nástroje vykazovali stabilní průběhy silového zatížení.

Při frézování oceli 15 142 (obr. 10.24 - obr. 10.25) bylo dosaženo průměrných hodnot celkové síly $F=1500\text{N}$ a řezné síly $F_c=1420\text{N}$ (pro frézu RMC) a hodnot $F=1030\text{N}$ a $F_c=930\text{N}$ (pro frézu ZPS). Došlo k poklesu celkové síly F o cca 45,6% a řezné síly F_c o cca 52,7% při použití katalogového nástroje ZPS, který také vykazoval stabilní průběh silového zatížení v průběhu obrábění.



Obr. 10.26 Porovnání průměrných hodnot řezných sil při sousledném frézování různorodých materiálů.

Poznámka: Na obr. 10.26 jsou znázorněny průměrné hodnoty řezné síly F_c při použití obou řezných nástrojů (RMC, ZPS) při frézování různorodých materiálů. Grafická závislost opět slouží pouze pro rychlé porovnání dosažené průměrné hodnoty řezné síly F_c pro oba testované nástroje, jelikož byly nastavené rozdílné řezné podmínky pro obráběné materiály.

10.9 Zhodnocení obrábění různorodých materiálů

V průběhu experimentu byly systematicky obráběné různorodé materiály. Jako první bylo obráběno „umělé dřevo“ SikaBlock M450 (lehce obrobitelné), dále následovaly dvě hliníkové slitiny (dural a silumin) s dobrou obrobitelností. Aby bylo možné posoudit vhodnost navržené geometrie nového řezného nástroje RMC pro konstrukční účely, byla obráběna nelegovaná ušlechtilá konstrukční ocel C45E (1.1191, ČSN 41 2050), které se běžně používá pro širokou škálu strojírenských výrobků. Pro porovnání řezivosti nástroje byla, za snížených řezných podmínek, obráběna i nízkolegovaná chrom-molybdenová ocel 42CrMoS4 (1.7227, ČSN 41 5142), která je využívána pro vysoce namáhané strojní součásti.

Z průběhu silového zatížení je patrné, že při použití katalogového nástroje ZPS byly dosaženy nižší hodnoty působících silových složek F_c , F_{cN} a F_p a celkové síly F při nesousledném i sousledném frézování při obrábění všech materiálů (s výjimkou umělého dřeva) ve srovnání s nástrojem RMC.

Vyšší hodnoty řezné síly F_c jsou při obou typech frézování způsobeny děleným ostřím nástroje RMC (každý břit disponuje dvěma kompenzačními břity), které způsobuje větší rázy při najíždění jednotlivých zubů do záběru. Značný vliv na velikost řezné síly má i směr natočení a úhel stoupání šroubovice λ_s . Větší rázy jsou také způsobené menší hodnotou úhlu stoupání šroubovice, který je u nástroje RMC 17° (ZPS 40°). Dělené ostří má však tu výhodu, že vznikající třísky jsou menších rozměrů a jsou lépe odváděny z místa řezu, lepší odvod třísek je také způsoben menším úhlem stoupání šroubovice. Kladná hodnota pasivní síly F_p je u nástroje RMC způsobena právě přetočenou šroubovicí, než kterou disponuje standardní katalogový nástroj ZPS.

Průběh silového zatížení při obrábění „umělého dřeva“ SikaBlock M450 ukázalo, že při použití nástroje RMC bylo při sousledném frézování dosaženo nižší hodnoty řezné síly. Průměrné hodnoty řezné síly $F_c=42\text{N}$ (fréza RMC) a $F_c=45\text{N}$ pro frézu ZPS (= rozdíl 3N, který představuje 7,14% nárůst). Silové zatížení při obrábění umělého dřeva je velmi malé, tudíž je relativní nárůst řezné síly F_c , při použití nástroje ZPS, zanedbatelný.

Obrábění obou hliníkových slitin vykazovalo téměř shodné průběhy silového zatížení při použití obou nástrojů při sousledném i nesousledném frézování. Nižších hodnot všech silových složek i celkové síly F bylo dosaženo při použití nástroje ZPS, který vykazoval také lepší stabilitu obráběcího procesu v porovnání s nástrojem RMC.

Na stabilitu obráběcího procesu má značný vliv použití procesní kapaliny (chlazení, mazání, odvod třísek z místa řezu), z toho důvodu byla pro obrábění obou typů ocelí použita procesní kapalina CIMSTAR 597 (v poměru 5 dílů na 100 dílů vody).

Při obrábění oceli 12 050 bylo silové zatížení (při sousledném i nesousledném frézování) vyšší při použití frézy RMC v porovnání s druhým testovaným nástrojem. Z průběhů jednotlivých silových složek je patrný stabilní proces obrábění u obou

testovaných nástrojů, s výjimkou nesousledného frézování nástrojem ZPS (obr. 10.12). Rozptyl hodnot silových složek F_c a F_{cN} byl pravděpodobně způsobený nalepující se třískou na vzniklou obrobenou plochu obrobku (vzniklé třísky byly stále v interakci s nástrojem). Problém nalepujících se dlouhých třísek u nesousledného frézování byl u nástroje RMC potlačen děleným ostřím, které způsobuje tvorbu kratších třísek, které jsou lépe odváděny z místa řezu. Vyšší hodnoty jednotlivých silových složek (u nástroje RMC) je možné opět přičíst dělenému ostří, natočení a úhlu stoupání šroubovice.

Při obrábění oceli 15 142 bylo silové zatížení nástroje opět vyšší při použití frézy RMC. U sousledného frézování lze u obou nástrojů pozorovat stabilní proces obrábění, ke kterému přispělo i použití procesní kapaliny.

Z průběhů silových zatížení je patrné, že použití procesní kapaliny má pozitivní vliv nejen na stabilitu obráběcího procesu, ale také na kvalitu obrobené plochy. Kvalita obrobené plochy byla lepší při sousledném frézování, jelikož se řezný nástroj „neotírá“ o již obrobenou plochu součásti (obrobku). Sousledné frézování také vykazovalo menší hlučnost, v porovnání s frézováním nesousledným.

U sousledného frézování hodnota řezné síly F_c převyšovala ve všech případech (platí pro oba testované nástroje) hodnotu normálové síly F_{cN} , z toho důvodu byl nástroj vtahován do řezu a nedocházelo ke zhoršení kvality obrobené plochy.

Z výše popsaných důvodů bylo pro dlouhodobé řezné testy zvoleno sousledné frézování ušlechtilé konstrukční oceli ČSN 41 2050.

11 DLOUHODOBÉ ŘEZNÉ ZKOUŠKY

V této kapitole jsou popsány dlouhodobé řezné zkoušky při sousledném obrábění oceli ČSN 41 2050 za přispění procesní kapaliny. Experiment probíhal na vertikální frézce FB 32V, monitorovanými parametry byly silové zatížení a opotřebení břitu. Součástí této kapitoly je také pevnostní analýza napjatosti a deformace nástroje, pro kterou byla použita data získaná při obrábění. Poslední částí jsou snímky pořízené pomocí elektronového mikroskopu, které slouží k posouzení opotřebení nástroje, především, zdali došlo k odstranění povlaku z břitů řezného nástroje.

11.1 Obráběný materiál

Na základě provedených řezných zkoušek, které jsou uvedeny v kap. 10, bylo rozhodnuto, že pro dlouhodobé testování byla zvolena ocel ČSN 41 2050, jejíž mechanické vlastnosti a chemické složení jsou uvedeny v příloze 9. Rozměry polotovaru byly 100x26-150mm.

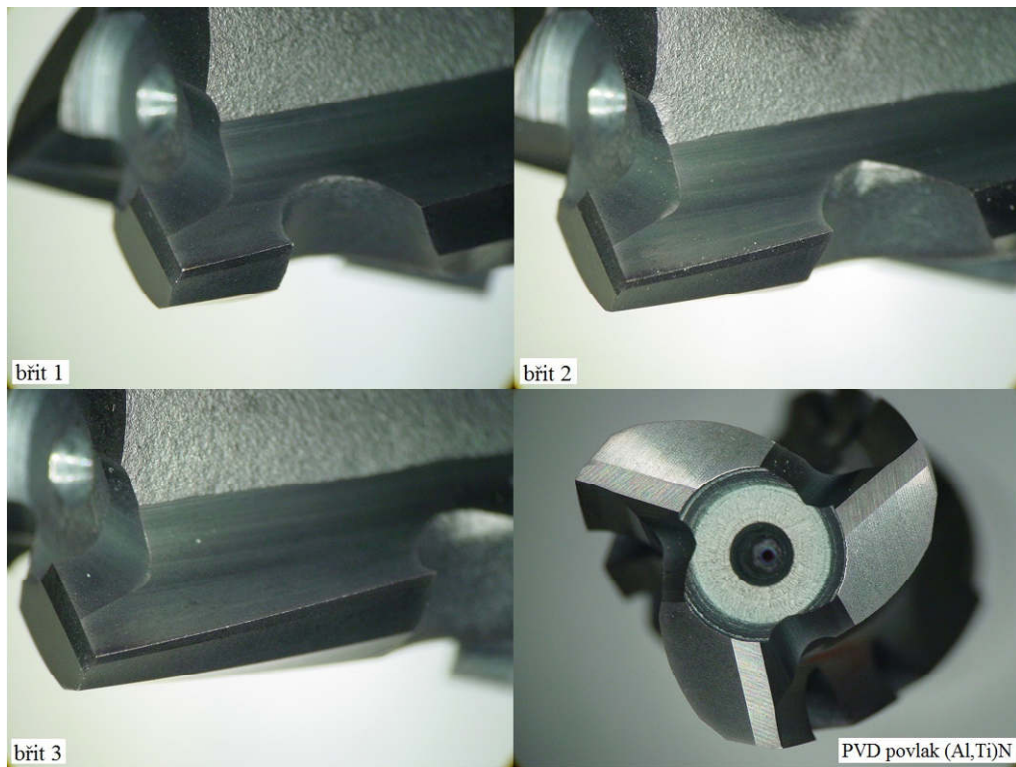
11.2 Obráběcí nástroje

Pro provedení experimentu byly použity nástroje RMC, pro porovnání naměřených dat byly opět použity nástroje od společnosti ZPS - Frézovací nástroje (nástroje budou opět označovány jako ZPS). K dispozici bylo celkem 8 řezných nástrojů, 4 nástroje RMC a 4 ZPS. Na nástrojích byly deponovány PVD povlaky (Al,Ti)N, (Al,Ti,Cr)N a nanokompozitní povlak nACo®, které byly na nástroje nanášeny společností Liss a.s. [41]. Pro zhodnocení přínosu nanášených PVD povlaků byly použity i nástroje nepovlakované. Charakteristiky jednotlivých nanášených povlaků jsou znázorněny v tab. 11.1.

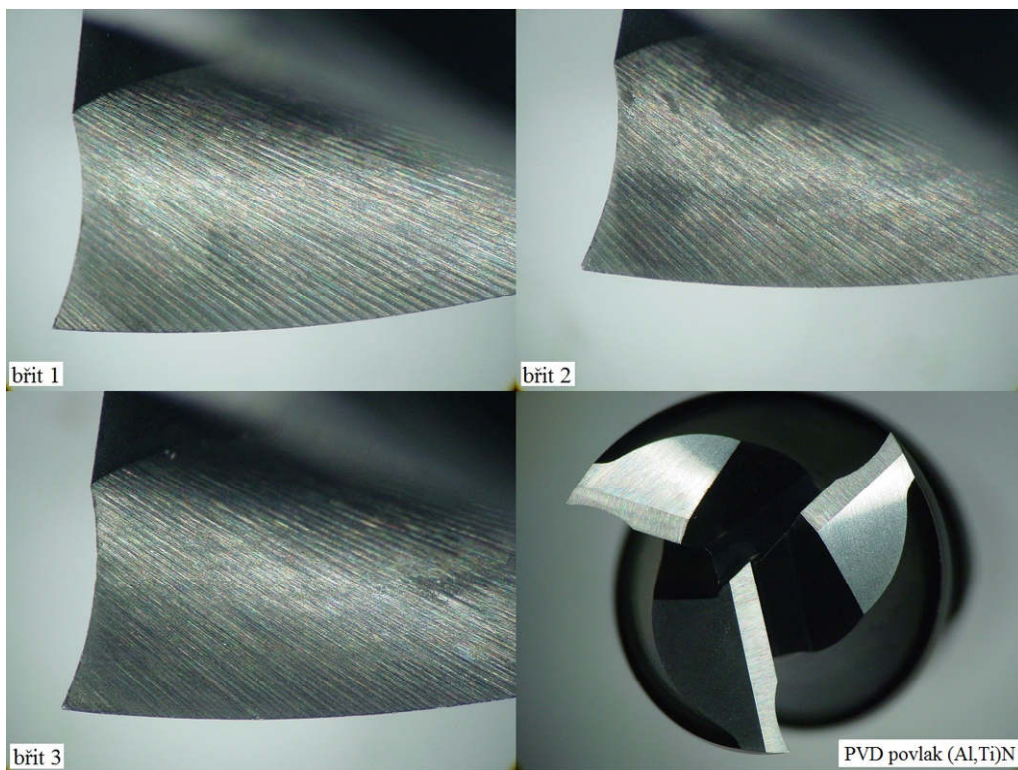
Tab. 11.1 Charakteristika deponovaných PVD povlaků.

Označení	Struktura	Barva	Nanotvrdost [GPa]	Tloušťka [μm]	Koef. tření (proti oceli) [-]	Max. teplota použití [°C]
(Al,Ti)N	monovrstva	černá	33	1-4	0,70	850
(Al,Ti,Cr)N	monovrstva	šedomodrá	34	1-4	0,55	900
nACo®	nanovrstva	fialovočerná	45	1-4	0,45	1200

Poznámka: Z tabulky 11. 1 je patrné, že každý povlak má rozdílnou barvu. Při pohledu na nástroje ovšem není možné okem pozorovat barevný rozdíl, proto jsou na následujících obrázcích obr. 11.1 a obr. 11.2 znázorněny břity obou testovaných nástrojů, před začátkem testování, s PVD povlakem (Al,Ti)N.



Obr. 11.1 Detaily jednotlivých břitů tříbřitého frézovacího nástroje RMC s PVD povlakem (Al,Ti)N, materiál HSSE 422993 PM.



Obr. 11.2 Detaily jednotlivých břitů tříbřitého frézovacího nástroje od společnosti ZPS – Frézovací nástroje s PVD povlakem (Al,Ti)N, jeden břit ostřen přes střed, materiál HSS Co8.

11.3 Obráběcí stroj

Pro testování byla opět zvolena vertikální frézka FB 32V, která je součástí strojového parku Ústavu Strojírenské Technologie na FSI VUT v Brně.

11.4 Řezné podmínky

Pro sousledné frézování oceli ČSN 41 2050 byla opět použita procesní kapalina CIMSTAR. Byly nastaveny vyšší řezné podmínky, ve srovnání s provedenými průjezdy v předchozím testování (tab. 10.7). Řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 11.2.

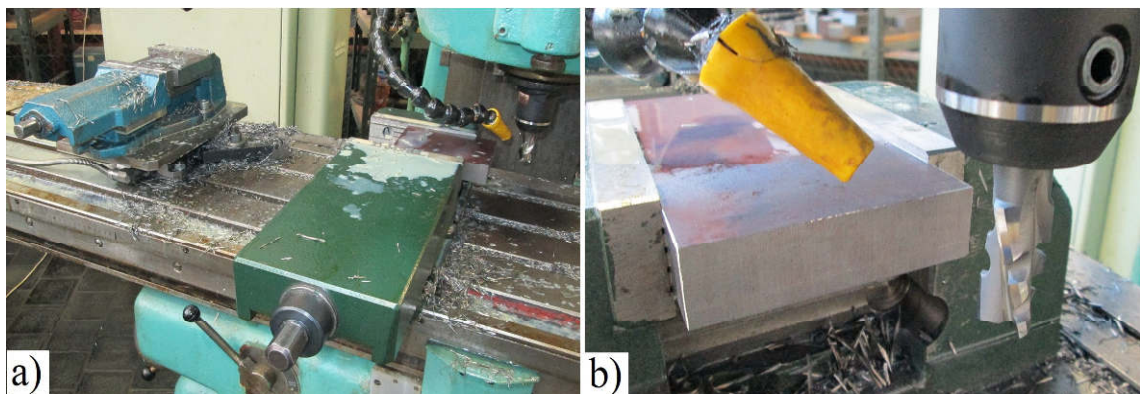
Tab. 11.2 Nastavené řezné podmínky.

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	65	m/min
Otáčky	n	1120	1/min
Posuvová rychlost	v_f	160	mm/min
Posuv na zub	f_z	0,0476	mm
Šířka záběru ostří	a_p	26	mm
Radiální šířka záběru	a_e	2	mm

Poznámka: Při obrábění bylo vždy nástrojem najeto 1mm pod obrobek (viz obr. 11.3b).

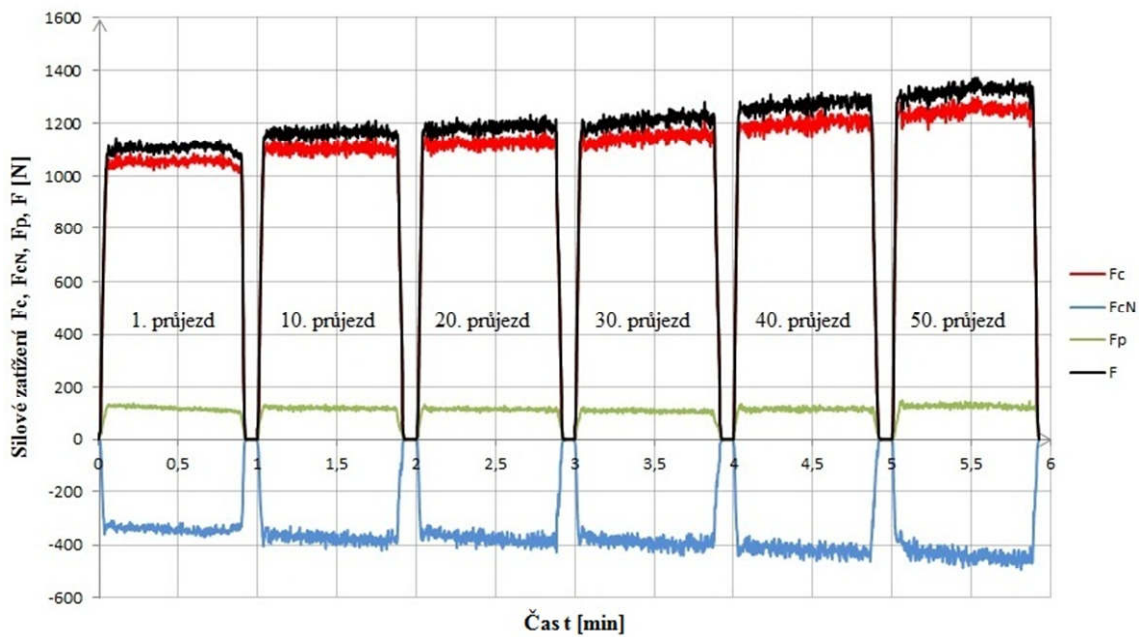
11.5 Průběh experimentu

Experiment probíhal na vertikální frézce FB 32V, na které bylo provedeno 50. průjezdů při stejných řezných podmínkách všemi testovanými nástroji. Aby nebyl zbytečně zatěžován dynamometr Kistler, probíhalo sousledné frézování na dvou místech (obr. 11.3a) Na pracovním stole frézky byly připevněny dva svěráky, ve kterých byl upnut obráběný materiál, přičemž k jednomu svěráku byl připojen dynamometr. Při testování všech osmi nástrojů byl vždy měřen 1., 10., 20., 30., 40. a 50. průjezd, ostatní průjezdy byly provedeny do materiálu, upnutém do druhého svěráku. Po výše zmíněných průjezdech byl vždy nástroj odepnut a bylo měřeno hřbetní opotřebení nástroje (kritérium VB) pomocí dílenského mikroskopu pro všechny tři břity. Schéma zapojení celé aparatury, postup měření a vyhodnocení silového zatížení je popsáno v kap. 10.6.

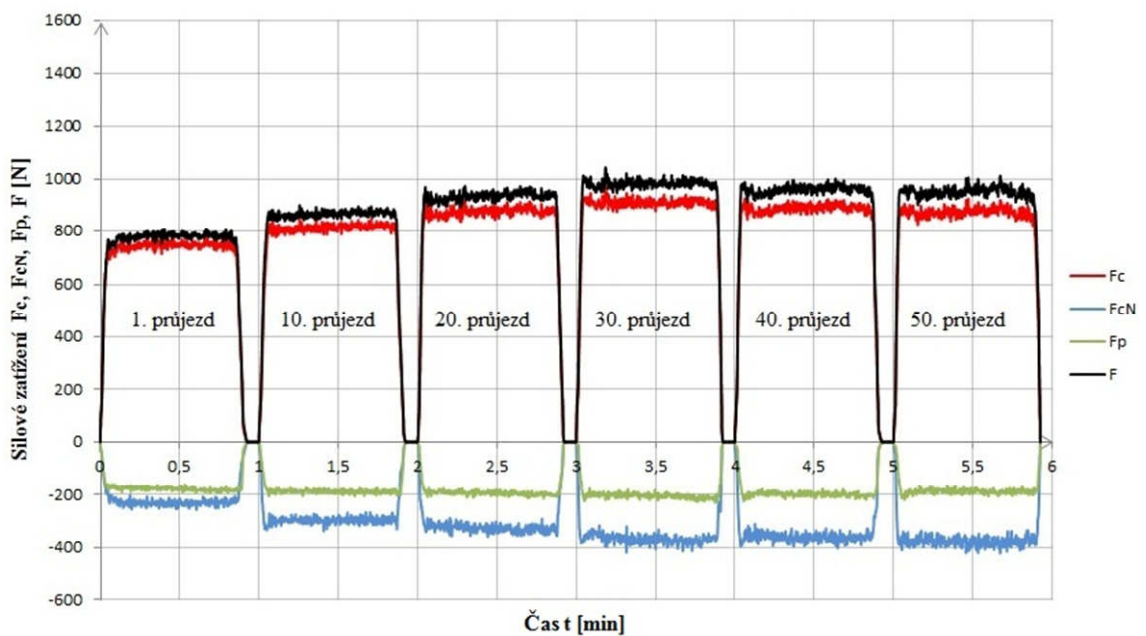


Obr. 11.3 Průběh experimentu.

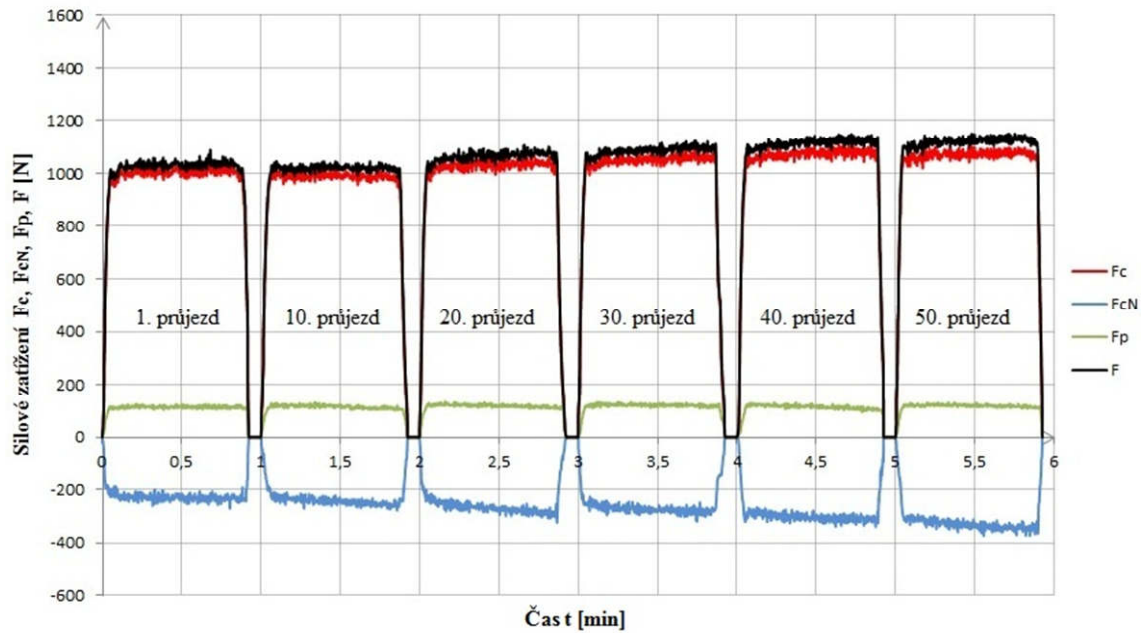
11.6 Vyhodnocení silového zatížení při sousledném frézování oceli



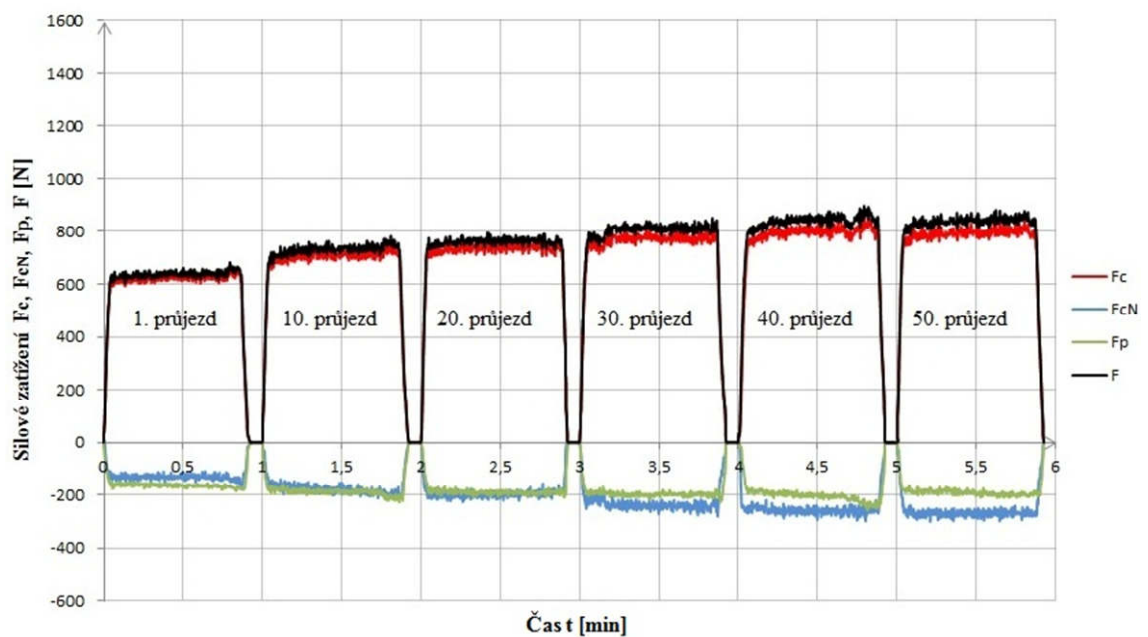
Obr. 11.4 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou frézu RMC při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



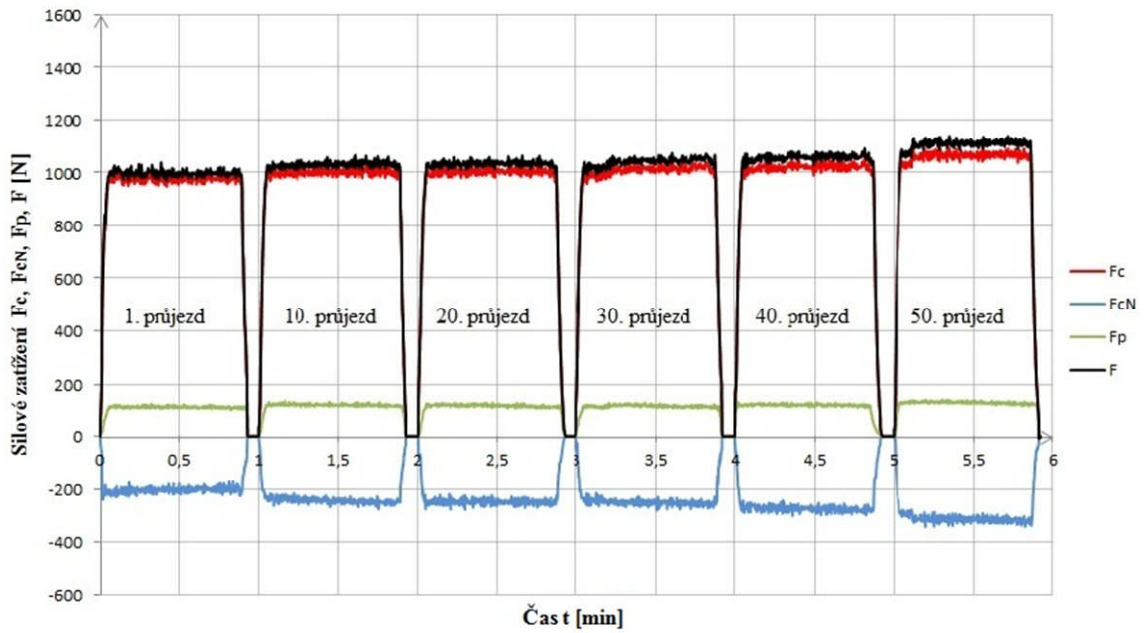
Obr. 11.5 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro nepovlakovanou frézu ZPS při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



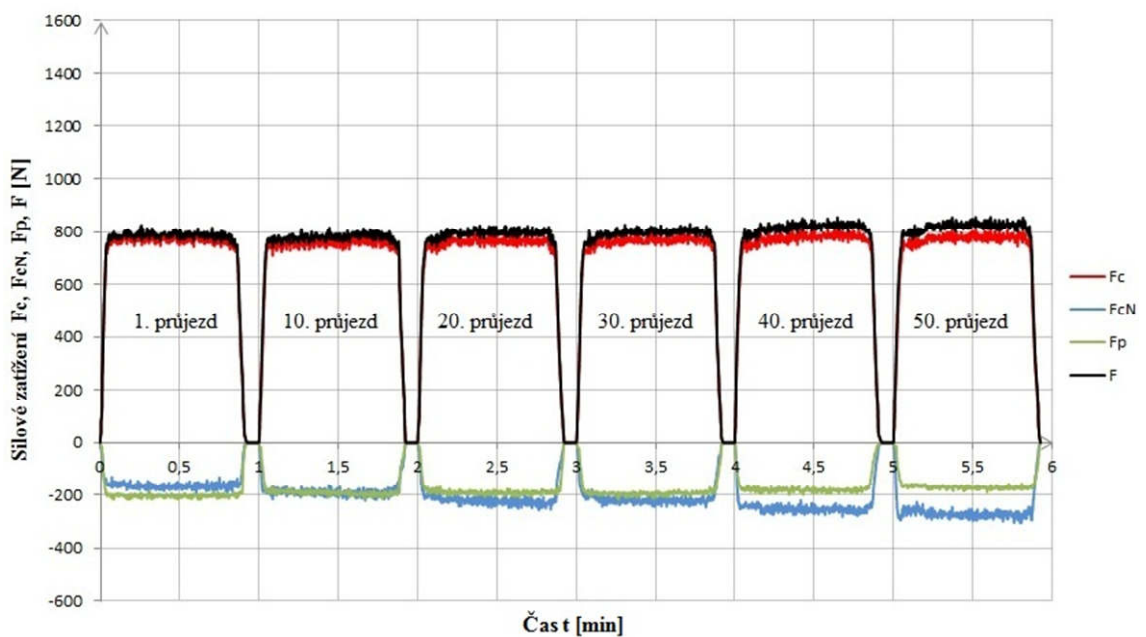
Obr. 11.6 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro frézu RMC s PVD povlakem (Al,Ti)N při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



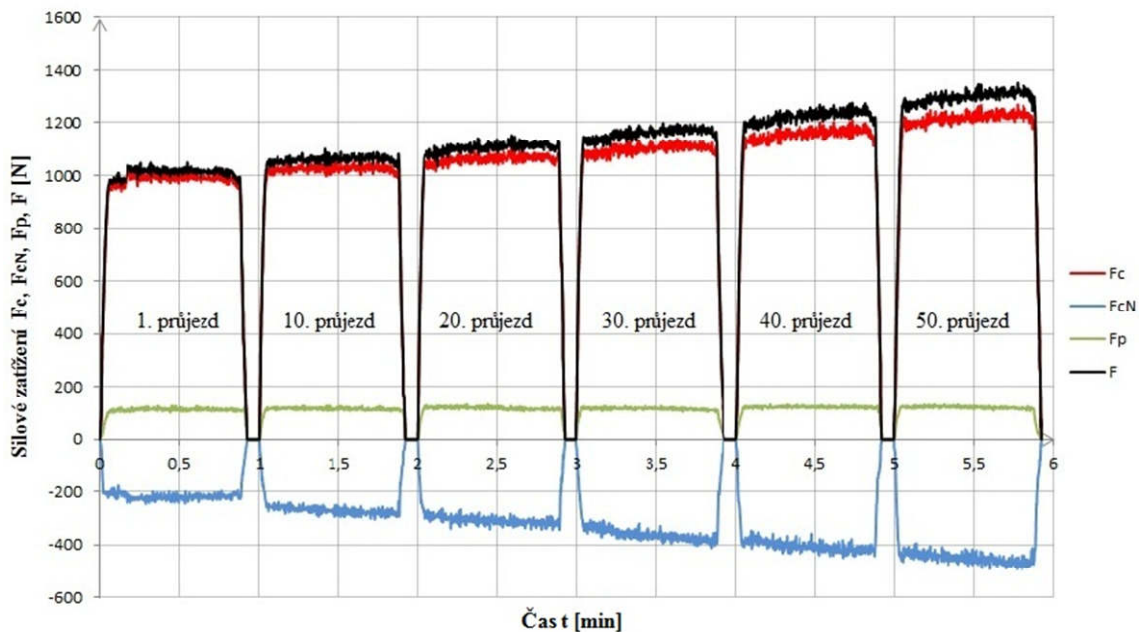
Obr. 11.7 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro frézu ZPS s PVD povlakem (Al,Ti)N při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



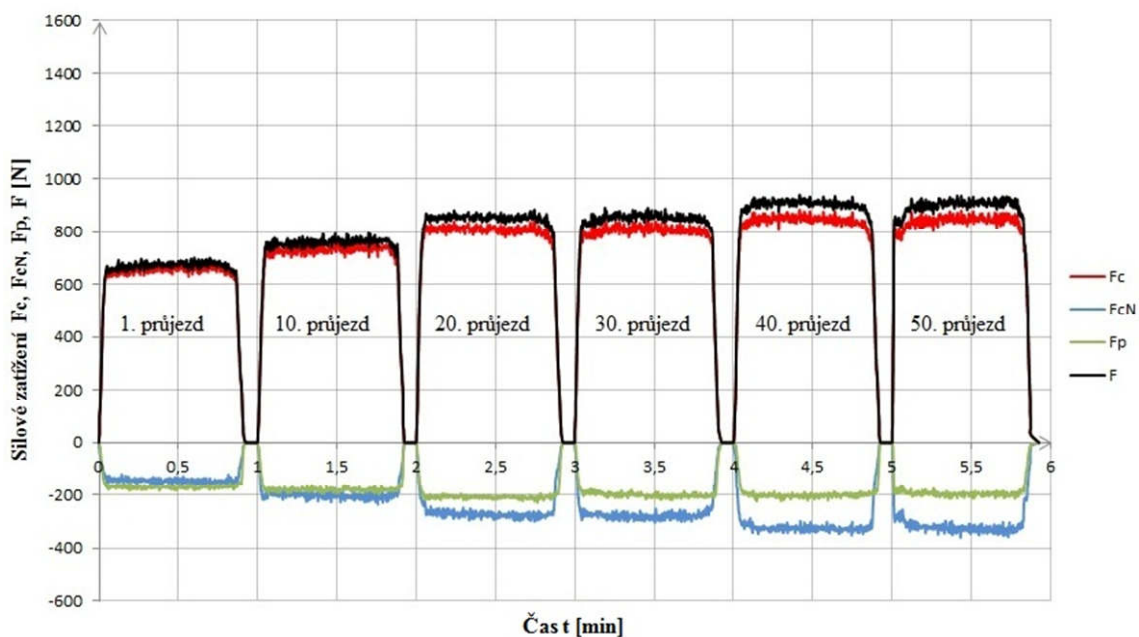
Obr. 11.8 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro frézu RMC s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



Obr. 11.9 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro frézu ZPS s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



Obr. 11.10 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro frézu RMC s PVD povlakem nACo® při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).



Obr. 11.11 Průběh silového zatížení v závislosti na čase pro frézu ZPS s PVD povlakem nACo® při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).

Poznámka: Časová osa u předešlých silových zatížení (obr. 11.4 – obr. 11.11) neodpovídá reálným časům obrábění z toho důvodu, aby bylo možné k sobě sestavit jednotlivé měřené průběhy (1., 10., 20., 30., 40. a 50. průjezd). Reálný čas odpovídající

jednomu průjezdu je $t=0,925\text{min}$ ($t=55,5\text{ s}$), což pro všechny provedené průjezdy (50 průjezdů) odpovídá celkovému času obrábění $t=46,25\text{ min}$.

Z průběhu silových zatížení při sousledném frézování oceli ČSN 41 2050 je patrné, že při použití nově navrženého nástroje RMC byly dosaženy vyšší hodnoty řezné síly F_c a celkové síly F ve srovnání s nástrojem ZPS. Vyšší hodnoty řezné síly F_c , u nástroje RMC, byly způsobeny především menším úhlem stoupání šroubovice λ_s a jejím natočením. Úhel stoupání šroubovice je u nástroje RMC 17° a u ZPS 40° . Vyšší hodnoty úhlu stoupání šroubovice způsobují plynulejší najetí nástroje do záběru, takže jsou generovány menší rázy při najíždění nástroje do obrobku. Větší rázy jsou u nástroje RMC také způsobeny děleným ostřím nástroje (každý břit je složen ze dvou kompenzačních břitů).

Z výše popsaných důvodů je zřejmé, že řezná síla F_c a tím pádem i výsledná celková síla F dosahuje při použití nástroje RMC vyšších hodnot v porovnání s nástrojem ZPS. Dělené ostří má však tu výhodu, že vznikající třísky jsou menších rozměrů a jsou lépe odváděny z místa řezu (při použití katalogového nástroje ZPS se vznikající třísky nalepovaly na obrobenou plochu).

Kladná hodnota pasivní síly F_p je u nástroje RMC způsobena přetočenou šroubovicí, než kterou disponuje standardní katalogový nástroj ZPS (viz obr. 9.19 a obr. 10.1).

Dosažené průměrné hodnoty řezné síly F_c na začátku a na konci testování jsou zobrazeny v tab. 11.3 a na obr. 11.12. Monitorovaným parametrem nebyla hodnota řezné síly F_c na začátku ani na konci frézování, ale její relativní nárůst, získaný právě z naměřených hodnot na začátku a na konci testování.

Tab. 11.3 Průměrné hodnoty řezné síly F_c na začátku a konci frézování.

Nástroj	Hodnota F_c na začátku testování [N]	Hodnota F_c na konci testování [N]	Hodnota nárůstu řezné síly F_c [N]	Relativní nárůst řezné síly F_c [%]
RMC – bez povlaku	1052	1247	195	18,54
ZPS – bez povlaku	745	874	129	17,32
RMC + (Al,Ti)N	1000	1070	70	7,00
ZPS + (Al,Ti)N	622	793	171	27,49
RMC + (Al,Ti,Cr)N	975	1062	87	8,92
ZPS + (Al,Ti,Cr)N	765	773	8	1,05
RMC + nACo®	982	1215	233	23,73
ZPS + nACo®	655	840	185	28,24

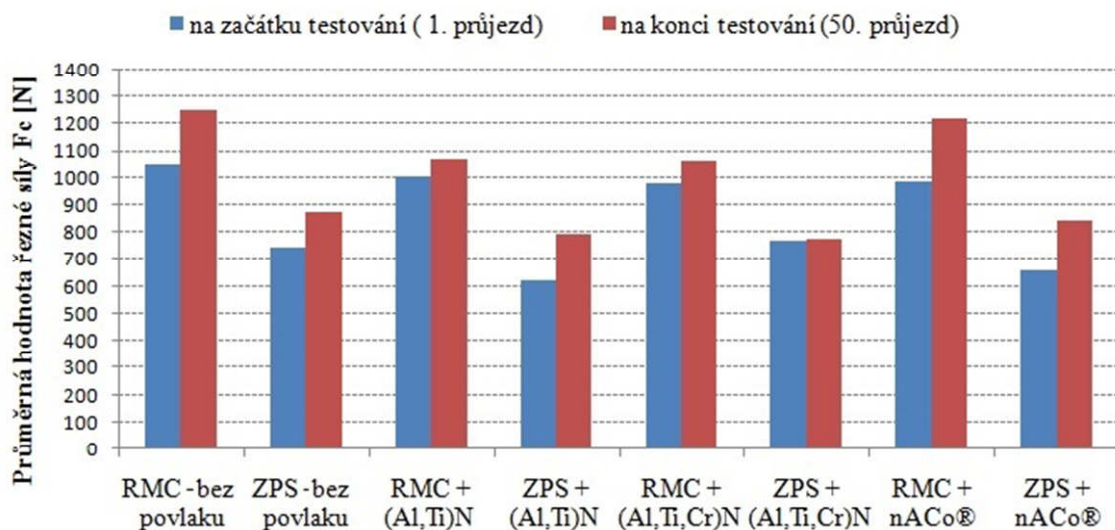
Nejnižších hodnot řezné síly $F_c=622\text{N}$ bylo na začátku testování dosaženo při použití nástroje ZPS s PVD povlakem (Al,Ti)N, ovšem po skončení testování (po 50. průjezdu) byla naměřena hodnota $F_c=793\text{N}$, což představuje 27,49% nárůst. Při použití nástroje RMC se stejným povlakem (Al,Ti)N bylo dosaženo hodnot $F_c=1000\text{N}$ na začátku testování a $F_c=1070\text{N}$ na konci testování, což představuje pouze 7% nárůst řezné síly F_c .

Nejvyšších hodnot bylo dosaženo s nepovlakovaným nástrojem RMC. Po 1. měřeném průjezdů nabyla řezná síla průměrné hodnoty $F_c=1052\text{N}$ a po 50. průjezdu hodnoty $F_c=1247\text{N}$, což představovalo 18,54% nárůst. Při použití nepovlakovaného nástroje ZPS byly získány hodnoty $F_c=745\text{N}$ (začátek) a $F_c=874\text{N}$ (konec), došlo k nárůstu řezné síly o 17,32%.

Dále byly testovány oba nástroje s povlakem (Al,Ti,Cr)N. Fréza RMC dosáhla průměrných hodnot řezné síly na začátku testování $F_c=975\text{N}$ a na konci testování $F_c=1062\text{N}$ (nárůst 8,92%). Při použití nástroje ZPS bylo dosaženo pouze 1,05% nárůstu řezné síly F_c po skončeném frézování, rozdíl na začátku frézování a na konci frézování činil zanedbatelných 8N (na začátku testování $F_c=765\text{N}$ a na konci frézování $F_c=773\text{N}$).

Jako nejméně vhodný deponovaný PVD povlak se ukázal nanokompozitní povlak nACo®. Při použití nástroje RMC bylo dosaženo průměrných hodnot $F_c=982\text{N}$ (začátek) a $F_c=1215\text{N}$ (konec), při použití nástroje ZPS hodnot $F_c=655\text{N}$ (začátek) a $F_c=840\text{N}$ (konec). U obou testovaných nástrojů bylo dosaženo více než 20% nárůstu řezné síly F_c (23,73% u frézy RMC a 28,24% u frézy ZPS). Bylo dosaženo vyšší hodnoty relativního nárůstu silové složky F_c po skončeném testování v porovnání s nástroji bez povlaku.

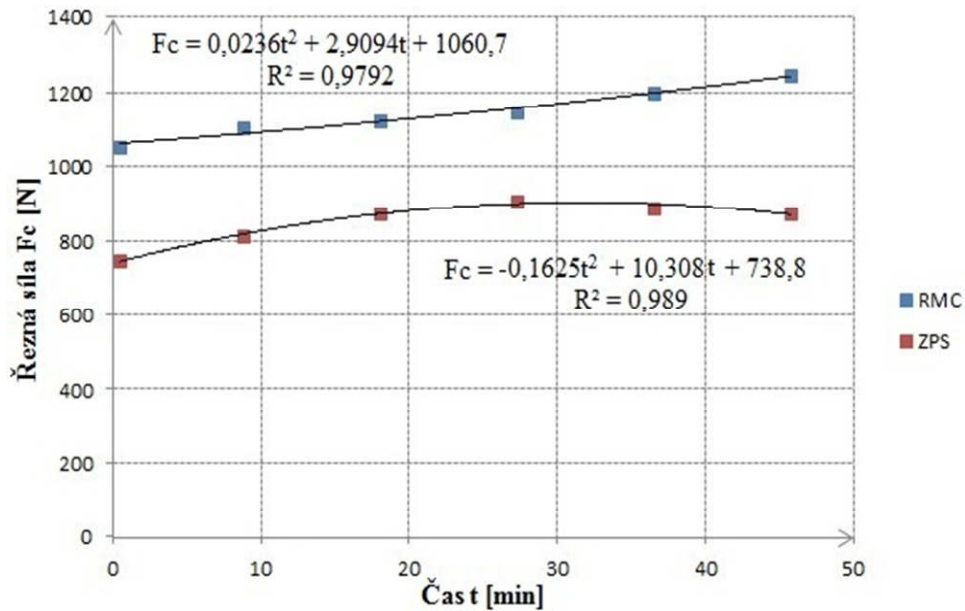
Z obr. 11.4 až 11.11 a z tab. 11.3 je patrné, že pro sousledné frézování oceli ČSN 41 2050 dosahuje jednoznačně nejlepších hodnot nástroj ZPS s povlakem (Al,Ti,Cr)N (nárůst pouhé 1,05%). Velice vhodné se také ukázaly nástroje RMC s povlakem (Al,Ti)N a (Al,Ti,Cr)N, kdy nárůst řezné síly byl menší než 10%. Všechny ostatní testované nástroje dosáhly více než 10% nárůstu řezné síly F_c po skončeném testování.



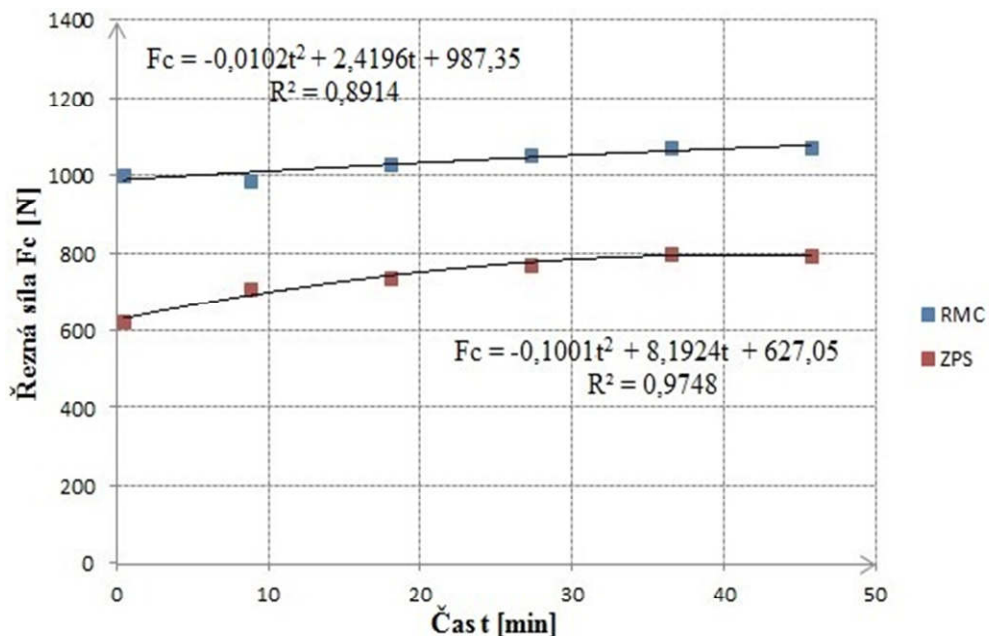
Obr. 11.12 Průměrné hodnoty řezné síly F_c na začátku a konci frézování pro všechny testované nástroje při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050).

11.7 Průměrné hodnoty řezných sil v závislosti na čase

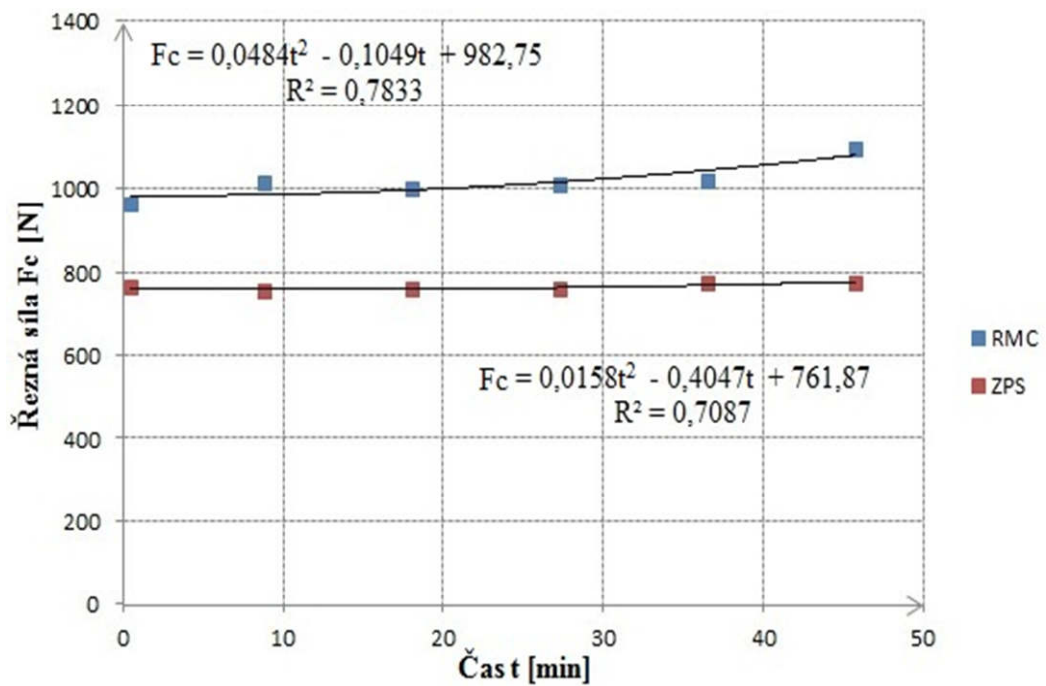
Aby bylo možné zjistit velikost působící řezné síly F_c v závislosti na daném časovém okamžiku, jsou na následujících obrázcích (obr. 11.13 až obr. 11.16) zobrazeny průměrné hodnoty řezných sil pro všechny testované nástroje pro 1., 10., 20., 30., 40. a 50. průjezd.



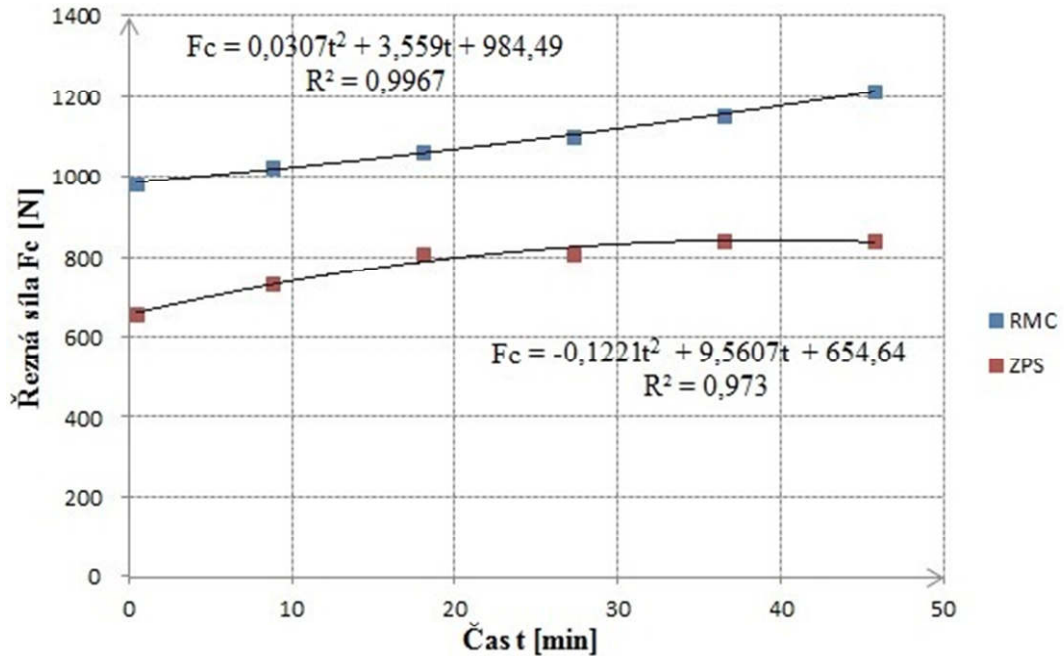
Obr. 11.13 Průměrné hodnoty řezné síly F_c v závislosti na čase při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050) nepovlakovanými nástroji.



Obr. 11.14 Průměrné hodnoty řezné síly F_c v závislosti na čase při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050) nástroji s PVD povlakem (Al,Ti)N.



Obr. 11.15 Průměrné hodnoty řezné síly F_c v závislosti na čase při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050) nástroji s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N.



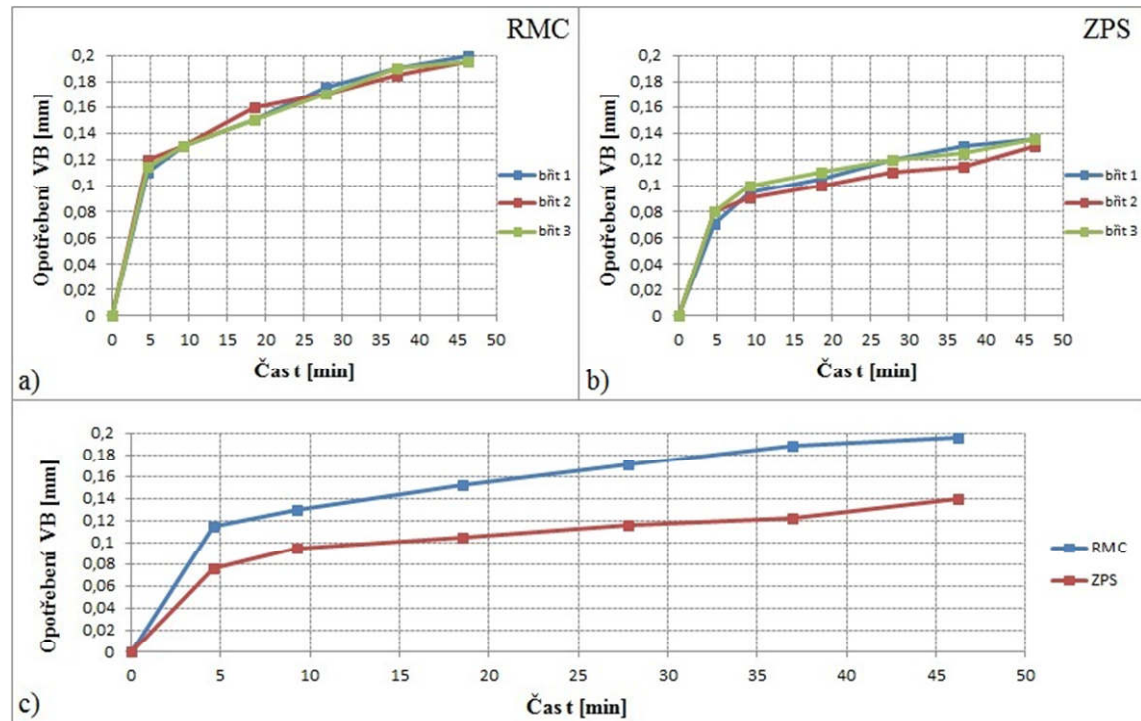
Obr. 11.16 Průměrné hodnoty řezné síly F_c v závislosti na čase při sousledném frézování oceli C45E (1.1191, ČSN 41 2050) nástroji s nanokompozitní PVD povlakem nACo®.

Pro vytvoření časových závislostí byly použity filtrované naměřené hodnoty při sousledném frézování oceli ČSN 41 2050. Aby nedošlo ke zkreslení jednotlivých závislostí, nebyly zde zahrnuty hodnoty řezné síly F_c , kdy řezný nástroj najížděl a vyjížděl ze záběru. Pomocí tabulkového procesoru Excel byly pro vykreslené křivky zobrazeny regresní rovnice, které ve všech případech představují polynom druhého stupně. Pomocí regresních rovnic lze při daném časovém okamžiku zjistit průměrnou hodnotu řezné síly F_c se spolehlivostí R^2 .

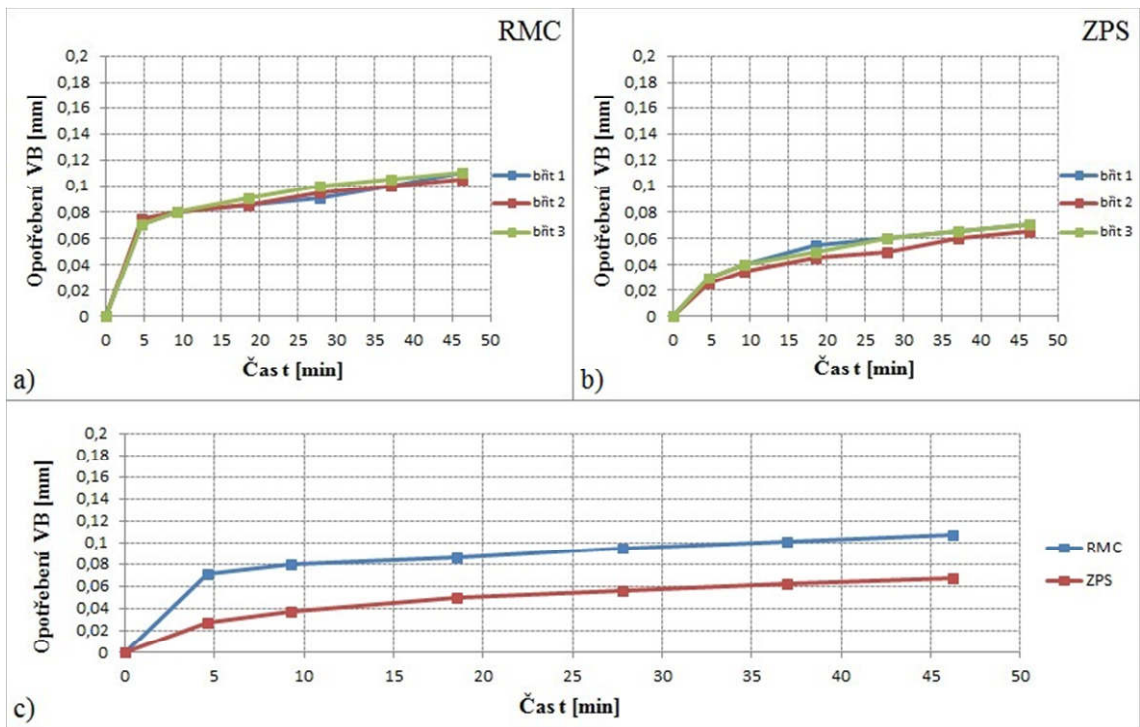
11.8 Opotřebení testovaných řezných nástrojů

Pro měření opotřebení řezných nástrojů bylo zvoleno kritérium VB (šířka fazetky opotřebení na hřbetě). Bylo provedeno 50 průjezdů při sousledném frézování konstrukční oceli ČSN 41 2050. Opotřebení bylo měřeno metodicky pomocí dílenského mikroskopu. Byly vždy měřeny všechny tři břity obou testovaných stopkových fréz (RMC, ZPS), při 1., 5., 10., 20., 30., 40. a 50. průjezdu materiálem. 50 průjezdů obráběným materiálem odpovídá trvanlivosti nástroje $T=46,25$ min.

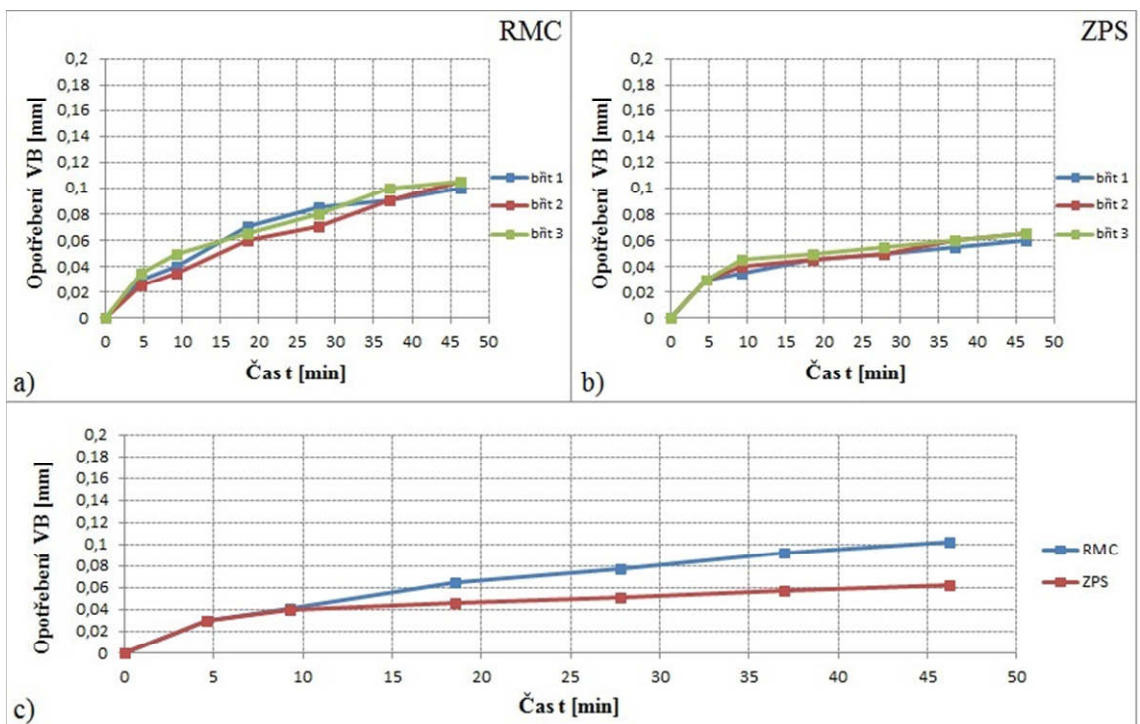
Poznámka: Měřené hodnoty opotřebení VB vykazovaly přibližně stejných hodnoty pro jednotlivé břity, proto pro porovnání opotřebení jednotlivých nástrojů byly stanoveny průměrné hodnoty VB. Grafické průběhy naměřených hodnot jsou zobrazeny na obr. 11.17 až obr. 11.20. Jsou zde zobrazeny vždy průběhy opotřebení pro všechny břity nástroje RMC a ZPS, ze kterých byly udělané průměrné hodnoty opotřebení VB.



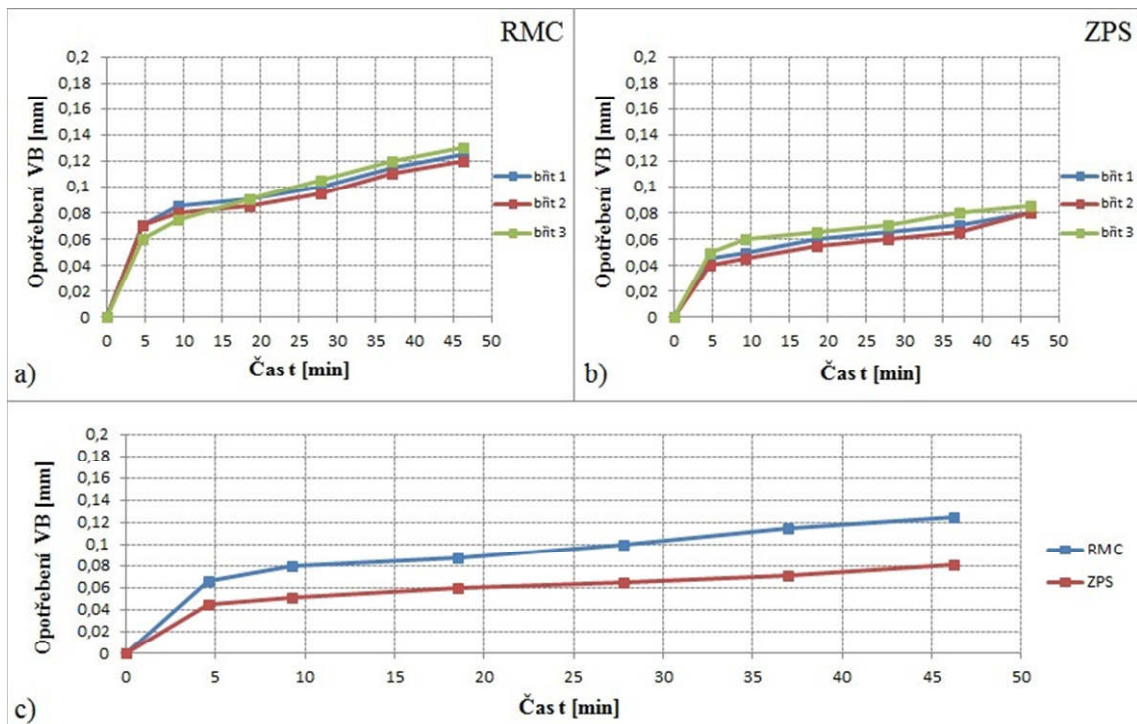
Obr. 11.17 Vývoj opotřebení nepovlakovaných řezných nástrojů při sousledném frézování oceli ČSN 41 2050: a) fréza RMC; b) fréza ZPS; c) průměrné hodnoty kritéria opotřebení VB.



Obr. 11.18 Vývoj opotřebení řezných nástrojů s PVD povlakem (Al,Ti)N při sousledném frézování oceli ČSN 41 2050: a) fréza RMC; b) fréza ZPS; c) průměrné hodnoty kritéria opotřebení VB.



Obr. 11.19 Vývoj opotřebení řezných nástrojů s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N při sousledném frézování oceli ČSN 41 2050: a) fréza RMC; b) fréza ZPS; c) průměrné hodnoty kritéria opotřebení VB.



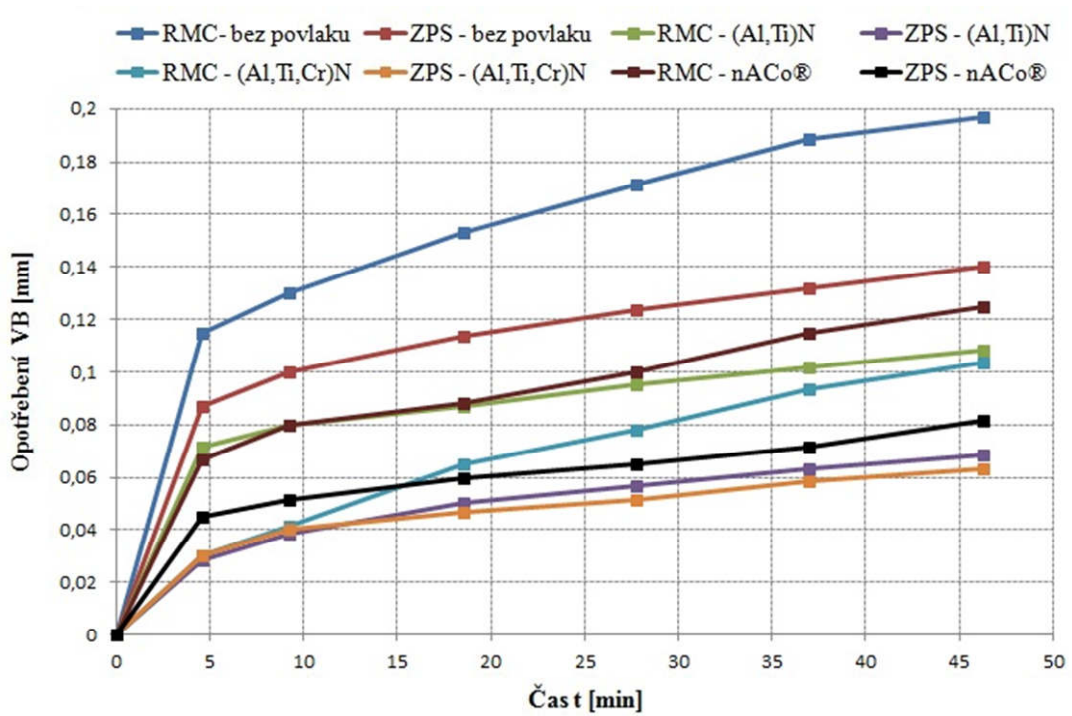
Obr. 11.20 Vývoj opotřebení řezných nástrojů s nanokompozitní PVD povlakem nACo® při sousledném frézování oceli ČSN 41 2050: a) fréza RMC; b) fréza ZPS; c) průměrné hodnoty kritéria opotřebení VB.

Na obr. 11.21 jsou znázorněny průměrné hodnoty opotřebení podle kritéria VB pro všechny testované nástroje. Nejnižší hodnoty VB po skončeném testování dosáhl nástroj ZPS s povlakem (Al,Ti,Cr)N, následován nástrojem ZPS s povlakem (Al,Ti)N. Naopak nejvyšší hodnoty dosáhl podle očekávání nástroj RMC bez povlaku, následovaný nepovlakovanou frézou ZPS. Všechny povlakované ZPS nástroje jako jediné dosáhly hodnot opotřebení VB menších než 0,1mm. Nejnižší hodnoty VB pro frézy RMC bylo dosaženo s deponovaným PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N (VB=0,103mm). Pouze nepovlakovaný nástroj RMC se přiblížil hranici VB= 0,2mm.

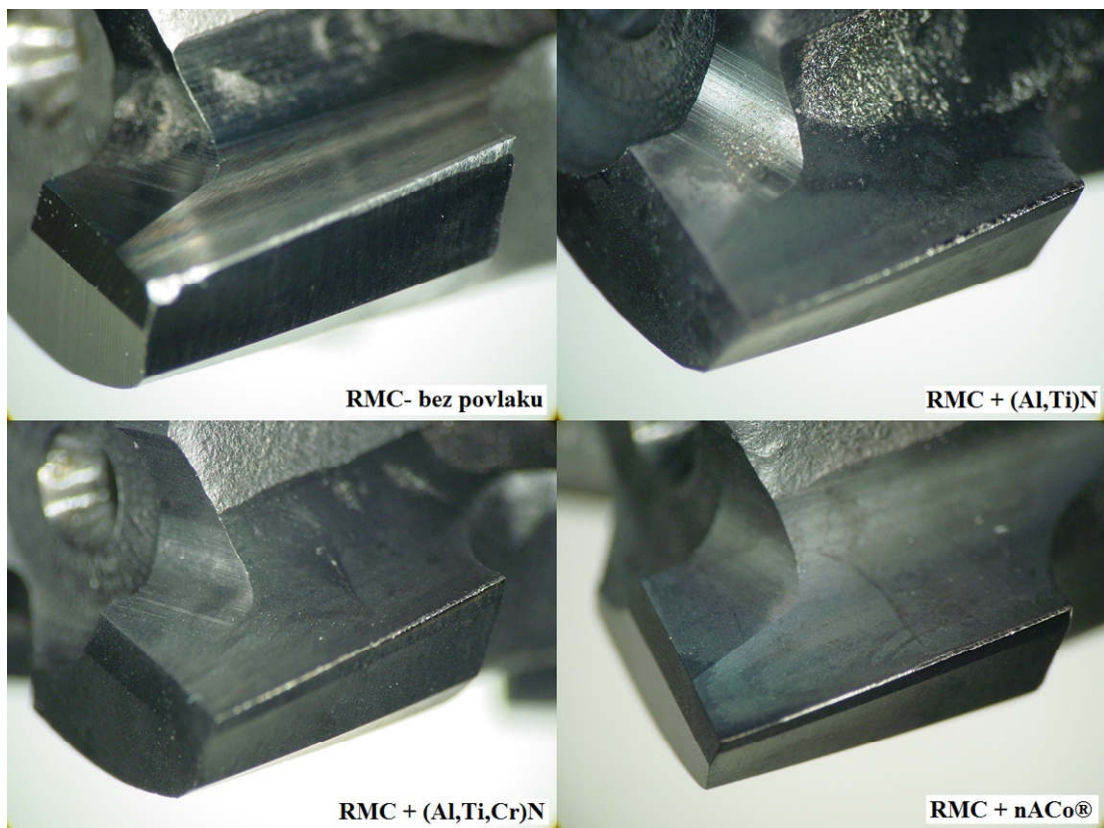
Dosažené hodnoty kritéria VB po provedených řezných zkouškách při sousledném frézování konstrukční oceli ČSN 41 2050 jsou zobrazeny v tab. 11.4. Na obr. 11.22 je možné pozorovat hřbetní a čelní opotřebení povlakovaných a nepovlakovaných stopkových fréz RMC.

Tab. 11.4 Dosažené konečné hodnoty opotřebení VB.

Nástroj	Dosažená hodnota opotřebení VB [mm]	Trvanlivost T [min]
RMC -bez povlaku	0,197	46,25
ZPS - bez povlaku	0,140	
RMC + (Al,Ti)N	0,108	
ZPS + (Al,Ti)N	0,068	
RMC + (Al,Ti,Cr)N	0,103	
ZPS + (Al,Ti,Cr)N	0,063	
RMC + nACo®	0,125	
ZPS + nACo®	0,082	



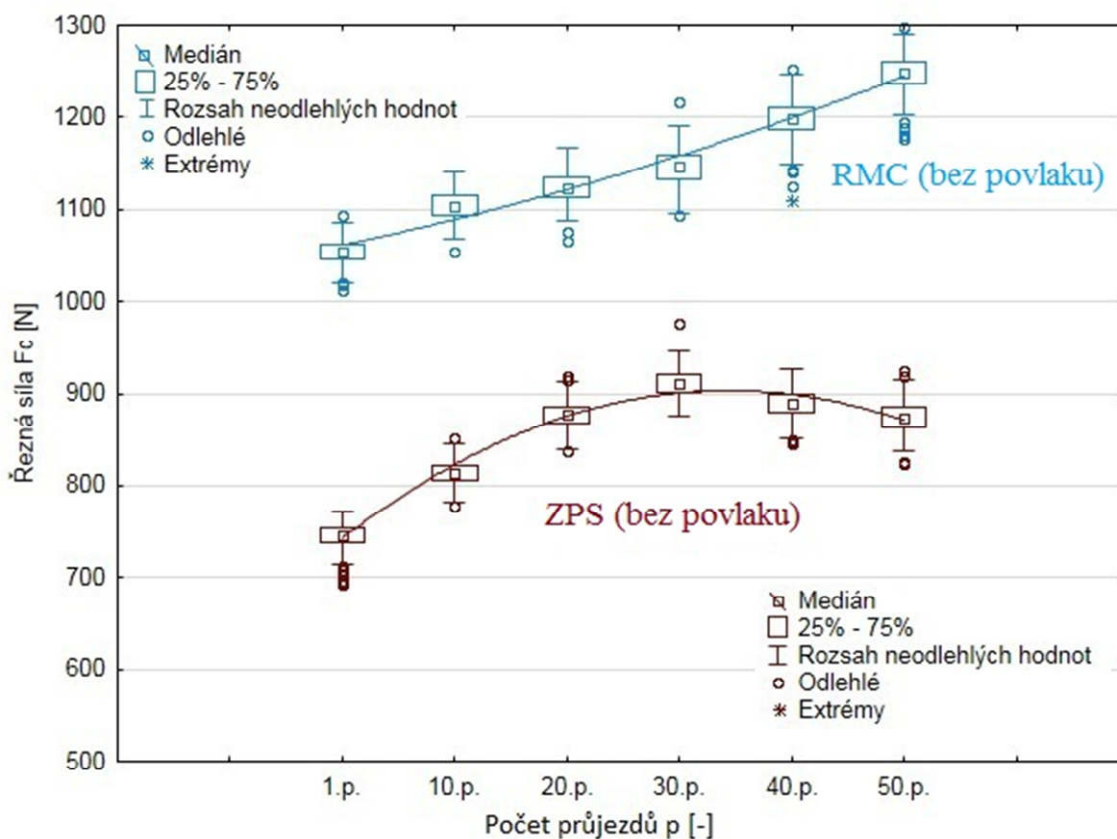
Obr. 11.21 Průběhy opotřebení VB pro všechny testované nástroje.



Obr. 11.22 Hřbetní a čelní opotřebení stopkových fréz RMC po řezných zkouškách.

11.9 Analýza řezných sil v průběhu opotřebení nástroje

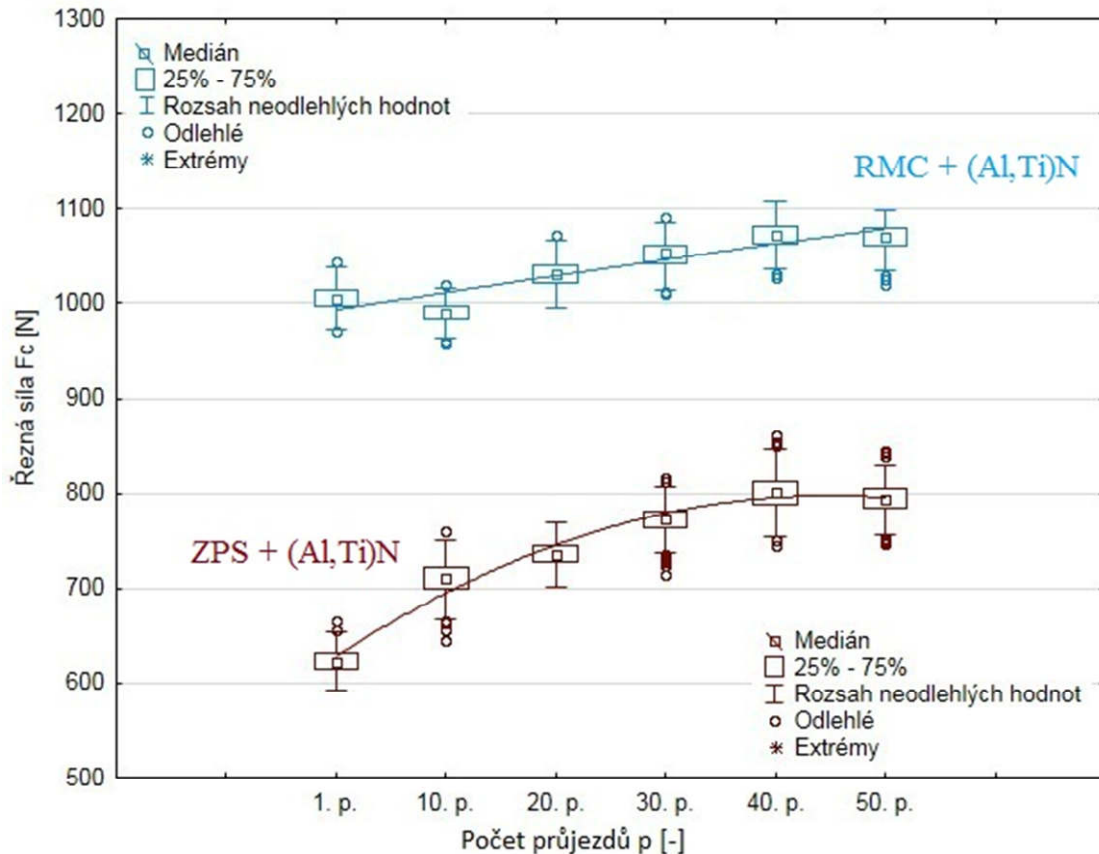
Pro analýzu naměřených řezných sil F_c při sousledném frézování oceli ČSN 41 2050 byly sestaveny následující grafické závislosti, které byly provedeny v software STATISTICA. Z použitých hodnot byly vynechány hodnoty získané při najetí nástroje do obrobku a hodnoty při vyjetí nástroje z obrobku, aby nedošlo ke zkreslení hodnoty řezné síly F_c a nedocházelo k velkému výskytu odlehlých hodnot, potažmo extrémů (viz obr. 11.23 až obr. 11.26). Pro všechny testované nástroje nastal předpokládaný trend, že řezná síla F_c v průběhu opotřebení má rostoucí charakter. Celkový čas obrábění byl $t=46,25$ min, který se rovná 50 průjezdům obráběným materiálem.



Obr. 11.23 Vývoj řezné síly F_c s rostoucím opotřebením pro nepovlakované nástroje.

U nepovlakované frézy RMC (obr. 11. 23) došlo k předpokládanému stavu, že s rostoucím opotřebením nástroje (s rostoucím počtem průjezdů) došlo k nárůstu řezné síly F_c . Výraznější změna rozsahu neodlehlých hodnot nastala při 30. průjezdu. U dalších měřených průjezdů se navíc vyskytuje větší množství odlehlých hodnot a extrémů, které jsou způsobeny rostoucím opotřebením řezného nástroje.

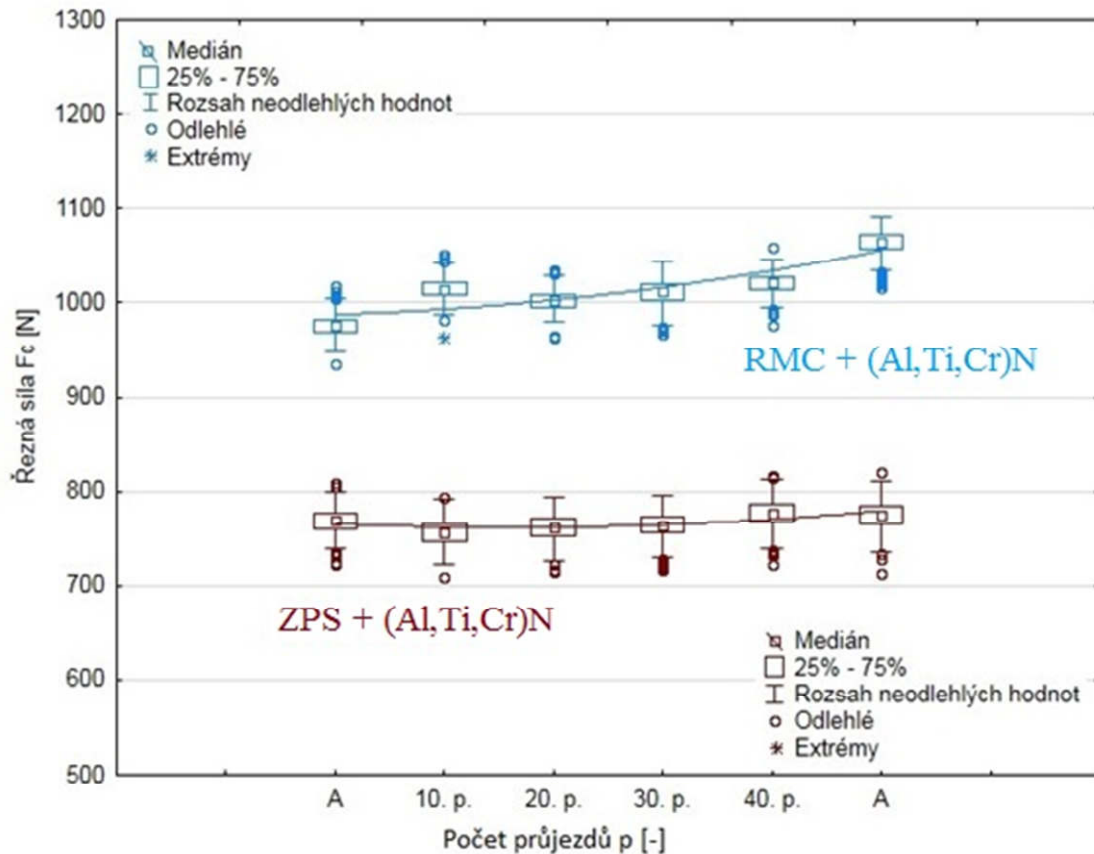
U nástroje ZPS hodnota řezné síly F_c rostla až do 30. průjezdu materiálem, kdy pravděpodobně došlo k vylomení části břitu, které způsobilo její pokles (o cca 5%). Výraznější změna rozsahu neodlehlých hodnot nenastala, odlehlé hodnoty se vyskytují pouze sporadicky.



Obr. 11.24 Vývoj řezné síly F_c s rostoucím opotřebením pro frézy s PVD povlakem (Al,Ti)N.

U obou testovaných nástrojů s PVD povlakem (Al,Ti)N (obr. 11.24) je možné pozorovat rostoucí trend, a to, že řezná síla F_c v průběhu opotřebení nástroje roste. Výraznější nárůst řezné síly je u nástroje ZPS, kde je možné pozorovat větší rozptyly neodlehých hodnot mezi jednotlivými průběhy. Z průběhu je také možné pozorovat větší množství odlehlých hodnot v porovnání s nástrojem RMC. Povlak (Al,Ti)N se ukázal jako vhodný kandidát pro depozici nově navržené geometrie nástroje RMC, jelikož nárůst řezné síly není značný. U nástroje také nebyl nalezen značný rozdíl v rozsahu neodlehých hodnot. Pouze u posledního průjezdu je možné pozorovat větší množství odlehlých hodnot, které je možné přičíst rostoucímu opotřebení nástroje.

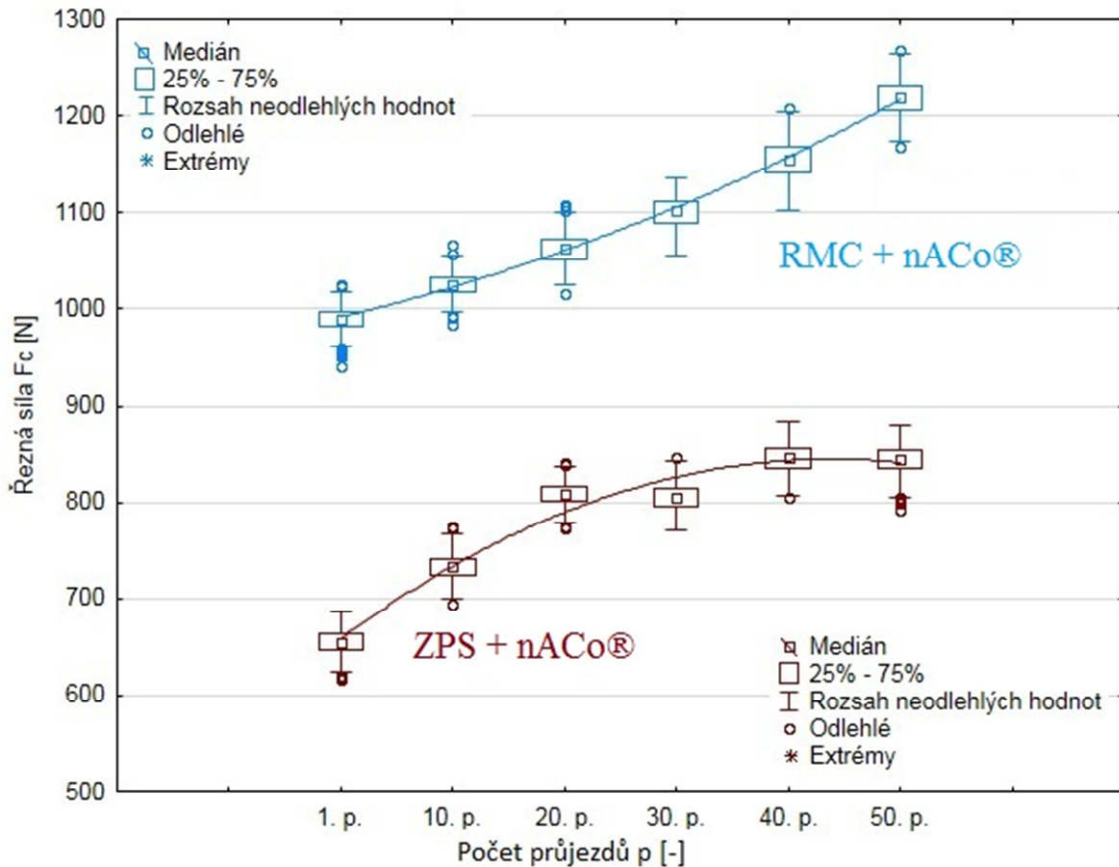
U nástrojů s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N je opět možné pozorovat (obr. 11.25) rostoucí hodnotu řezné síly F_c s rostoucím opotřebením nástroje. Je možné pozorovat nárůst řezné síly u nástroje RMC, který ovšem není značný, když uvážíme, že celkový strojní čas byl $t=46,25\text{min}$. Rozptyly neodlehých hodnot jsou pro všechny měřené průběhy konstantní, nachází se zde pouze několik odlehlých hodnot. Celkový průběh řezné síly na začátku a na konci frézování při použití nástroje RMC dosahoval téměř konstantních hodnot, došlo k nárůstu řezné síly F_c o 7N , což při počáteční hodnotě řezné síly $F_c=765\text{N}$ je zanedbatelné. Nebyl také nalezen výrazný rozptyl neodlehých hodnot, vyskytující se odlehlé hodnoty jsou pravděpodobně způsobeny odloupenutím části povlaku z ostří nástroje. Povlak (Al,Ti,Cr)N se ukázal jako nejvhodnější kandidát pro depozici na oba testované nástroje (RMC i ZPS).



Obr. 11.25 Vývoj řezné síly F_c s rostoucím opotřebením pro frézy s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N.

Na obr. 11.26 je zobrazen průběh nárůstu řezné síly F_c při použití nástrojů s nanokompozitním povlakem nACo®. Lze pozorovat, že nastal opět očekávaný nárůst řezné síly v průběhu rostoucího opotřebení při použití obou testovaných stopkových fréz. U nástroje RMC je možné pozorovat větší rozptyl u neodlehých hodnot pro 40. a 50. průjezd. U 1. průjezdu se vyskytuje značné množství odlehlých hodnot, které jsou pravděpodobně způsobeny špatným výběrem vstupních dat (některé hodnoty řezné síly ještě spadají do nájezdu nástroje do záběru). Při použití nástroje ZPS rostla řezná síla do 40. průjezdu (což odpovídá času 37min), kdy došlo k vylovení části břitu nástroje. Pro jednotlivé měření úseky nebyl pozorován statisticky významný rozptyl neodlehých hodnot, pouze u posledního průjezdu je možné pozorovat větší množství hodnot odlehlých, které jsou způsobeny právě vylovenou částí břitu při rostoucím opotřebení řezného nástroje.

Nanokompozitní povlak nACo® vykazoval při použití obou nástrojů největší nárůst řezné síly F_c , nárůst řezné síly dokonce převyšoval nárůsty řezných sil, naměřených při obrábění, za použití nepovlakovaných řezných nástrojů. Nejnižší nárůst řezné síly F_c byl pozorován při použití nástroje ZPS s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N, následován nástroji RMC s PVD povlakem (Al,Ti)N a (Al,Ti,Cr)N.



Obr. 11.26 Vývoj řezné síly F_c s rostoucím opotřebením pro frézy s PVD povlakem nACo®.

Z grafických závislostí na obr. 11.23 až obr. 11.26 je patrné, že povlaky na bázi nitridu Al-Ti jsou vhodnou volbou pro nástroje pracující s přerušovaným řezem a značně přispívají k pomalému nárůstu řezné síly F_c v průběhu testování nástroje (s rostoucím opotřebením). Pouze řezné nástroje s nanokompozitním povlakem nACo®, který je složen ze dvou složek (nc-AlTiN) a (a-Si₃N₄) dokázaly přesný opak. Oba nástroje dosahovaly největšího procentuálního nárůstu (více než 20%) řezné síly F_c v průběhu testování pro zvolené řezné podmínky při sousledném frézování konstrukční oceli ČSN 41 2050.

11.10 Pevnostní analýza napjatosti a deformace nástroje RMC

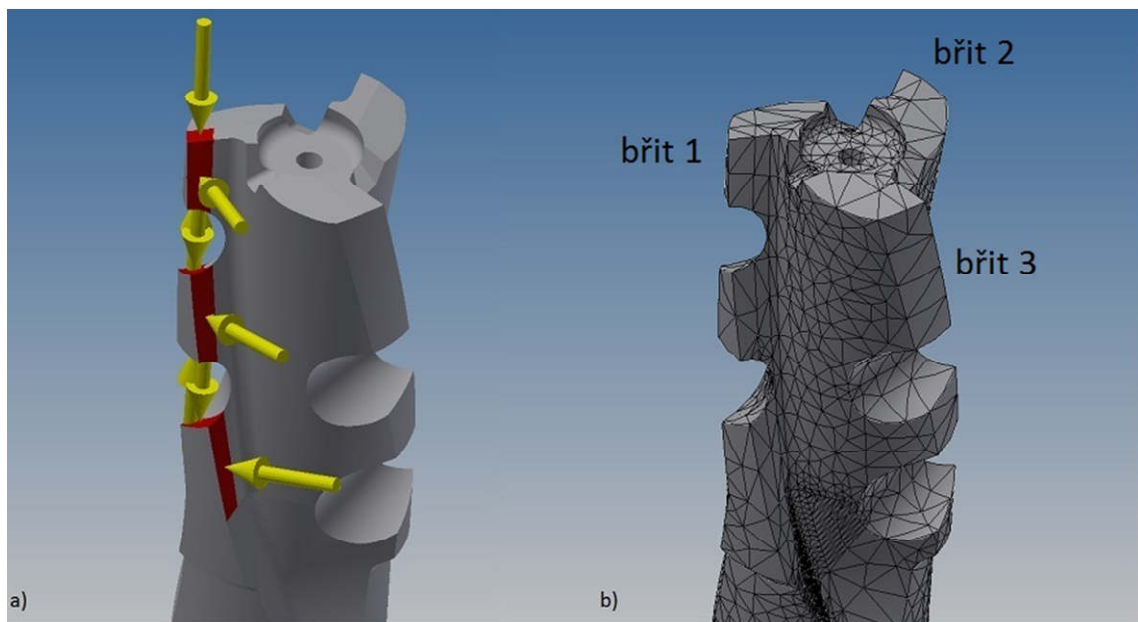
Pro provedení pevnostní analýzy, pro nově navrženou geometrii řezného nástroje RMC, byly použity data získaná při frézování oceli ČSN 41 2050. Analýza byla provedena v systému Autodesk Inventor Professional 2015.

Plocha, na kterou působí jednotlivé silové složky je obecného tvaru. Stanovení této plochy je velice obtížné, protože se jedná o zcela obecnou plochu. Pro výpočet byla použita plocha určená radiální šířkou záběru $a_e=2\text{mm}$ (délka plochy před rozdělením na jednotlivé segmenty odpovídala šířce záběru ostří $a_p=26\text{mm}$). Z toho důvodu, že je každý břit opatřen tzv. kompenzačními břity, bylo nutné plochu rozdělit na několik segmentů a následně silově zatížit (obr. 11.27a).

V případě katalogových nástrojů, které nejsou opatřeny kompenzačními břity, je pro statický výpočet maximálního zatížení při pevnostní analýze zvolena jednotná plocha a působící síla, která ovlivní výpočtový model pouze minimálně. Použitý výpočtový model rozdělí působící sílu rovnoměrně na celou plochu břitu nástroje [17].

U nástroje RMC bylo nutné plochu rozdělit do osmi segmentů a zatížit každý segment jednotlivě z toho důvodu, že je každý břit nástroje opatřen dvěma kompenzačními břity. Výsledkem bylo minimální ovlivnění výpočtového modelu. Použitý výpočtový model rozdělí působící sílu rovnoměrně na každý segment zatěžované plochy břitu nástroje.

Síť konečných prvků (obr. 11.27b) je složena z trojúhelníků o velikosti 0,2mm, která byla v předpokládaných oblastech koncentrace napětí, v místě kompenzačních břitů a ve výběhu brousicího kotouče) zjemněna na 0,1mm.

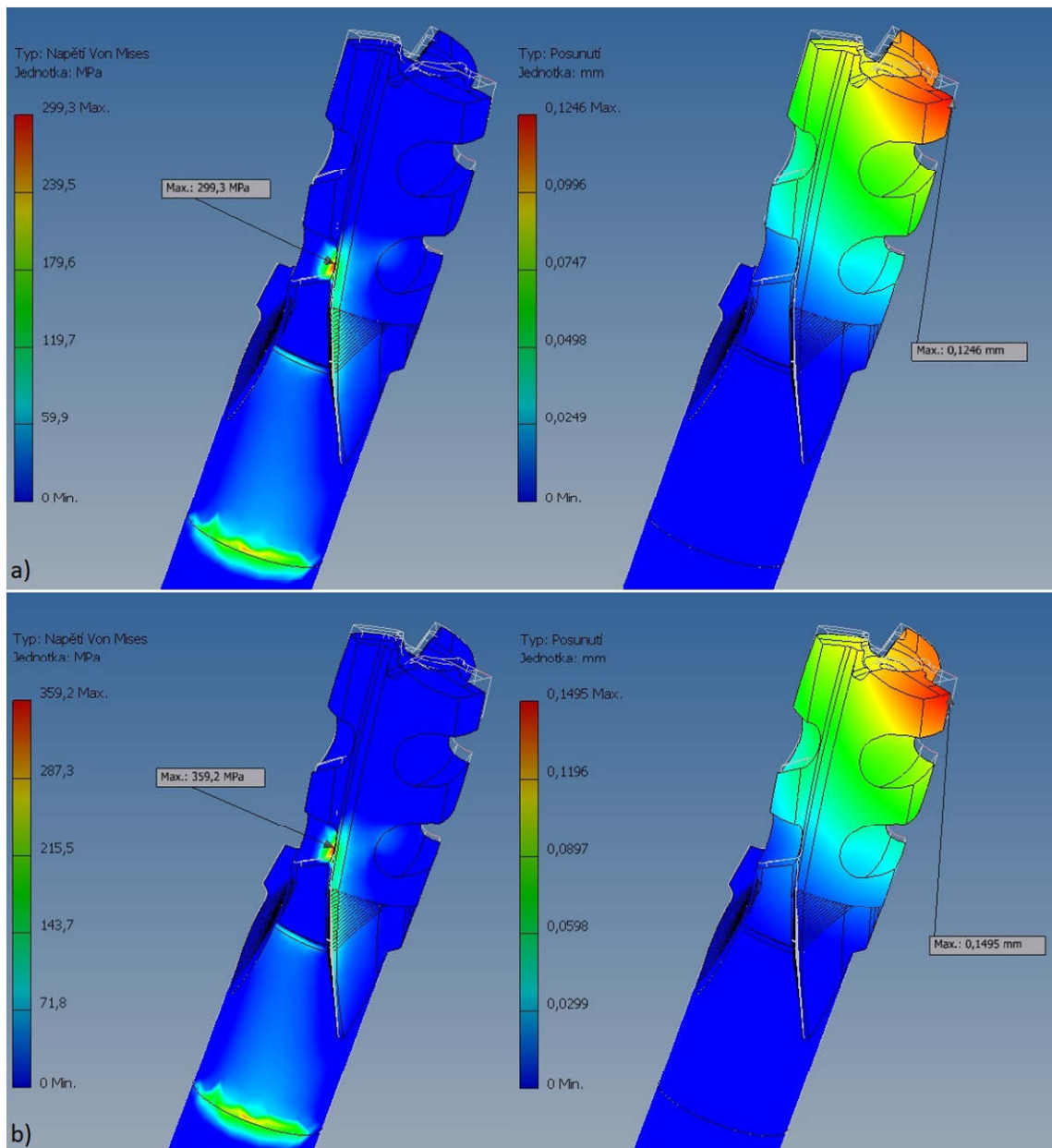


Obr. 11.27 Předpokládané silové zatížení a pohled sítě nástroje.

Z toho důvodu, že je nástroj opatřen kompenzačními břity, má každý břit nástroje specifickou geometrii a bylo tedy nutné rozdělit silové zatížení na jednotlivé segmenty zatěžující plochy podle velikosti daného segmentu. Z těchto důvodů je patrné, že silové zatížení není rozloženo na každém ze tří břitů stejně.

Po zatížení jednotlivých břitů nástroje bylo zjištěno, že bylo dosaženo přibližně stejných hodnot redukovaného napětí podle podmínky HMM a hodnot posunutí nástroje pro všechny břity. Z těchto důvodů jsou dále uváděny závislosti pouze pro **břit č. 1** (obr. 11.27b) pro všechny testované povlakované i nepovlakované nástroje RMC při obrábění oceli ČSN 41 2050.

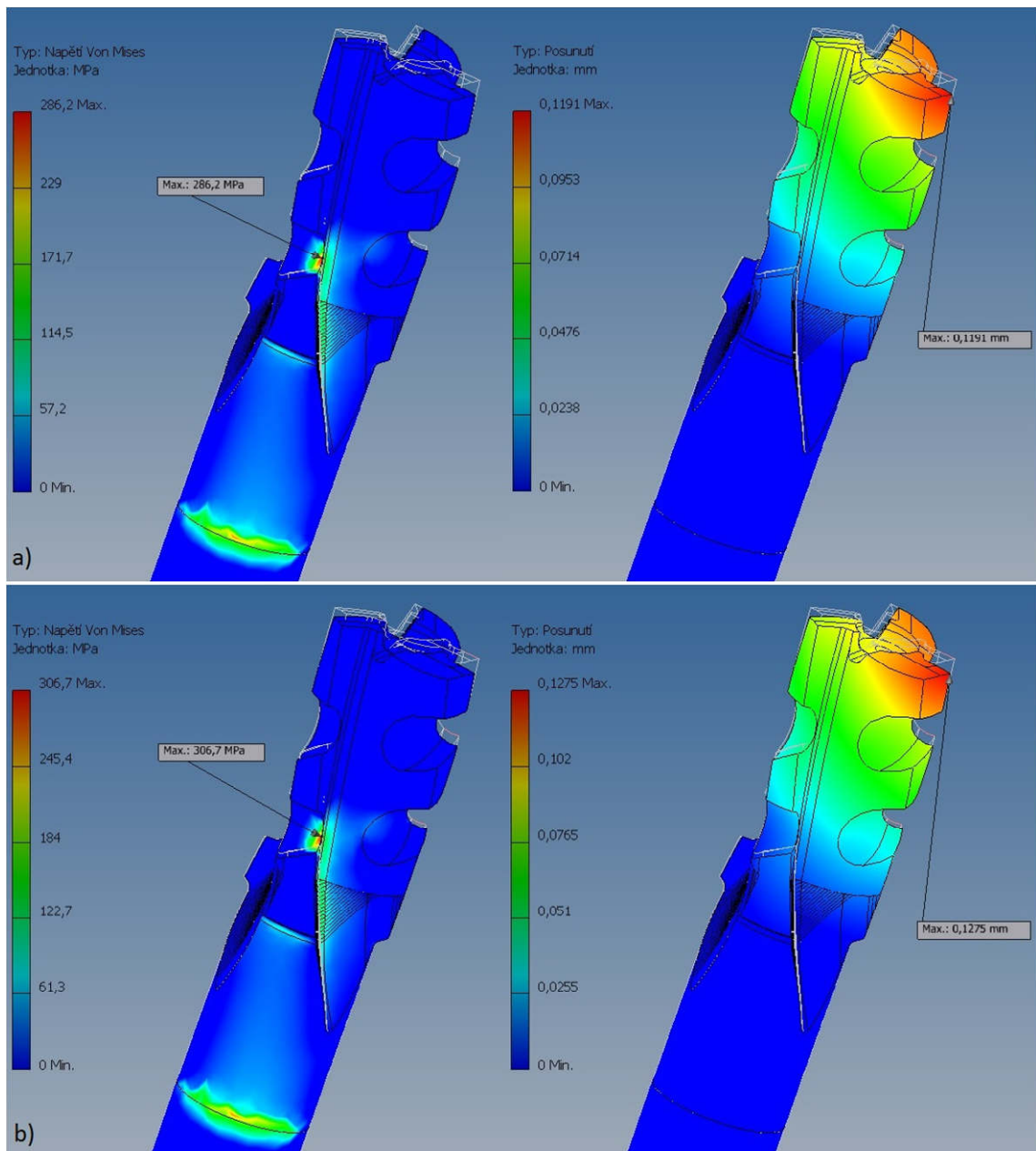
Hodnoty posunutí nástroje po zatížení jsou zobrazeny na obr. 11.28 až obr. 11.31. Maximální hodnoty posunutí byly pro všechny testované nástroje zjištěny v patě břitu č. 1. Relativní nárůst posunutí v průběhu testování je zobrazen v tab. 11.5.



Obr. 11.28 Statická analýza napjatosti a deformace nástroje pro nepovlakovanou frézu RMC: a) na začátku testování (po 1. průjezdu); b) na konci testování (po 50. průjezdu).

Maximální redukované napětí podle podmínky von Mises nabylo na počátku testování hodnoty 299,3MPa a na konci 359,2MPa, což představuje 20% nárůst. Podle předpokladu došlo k největšímu nárůstu maximálního redukovaného napětí pro nepovlakovanou frézu RMC, v porovnání s nástroji s PVD povlaky.

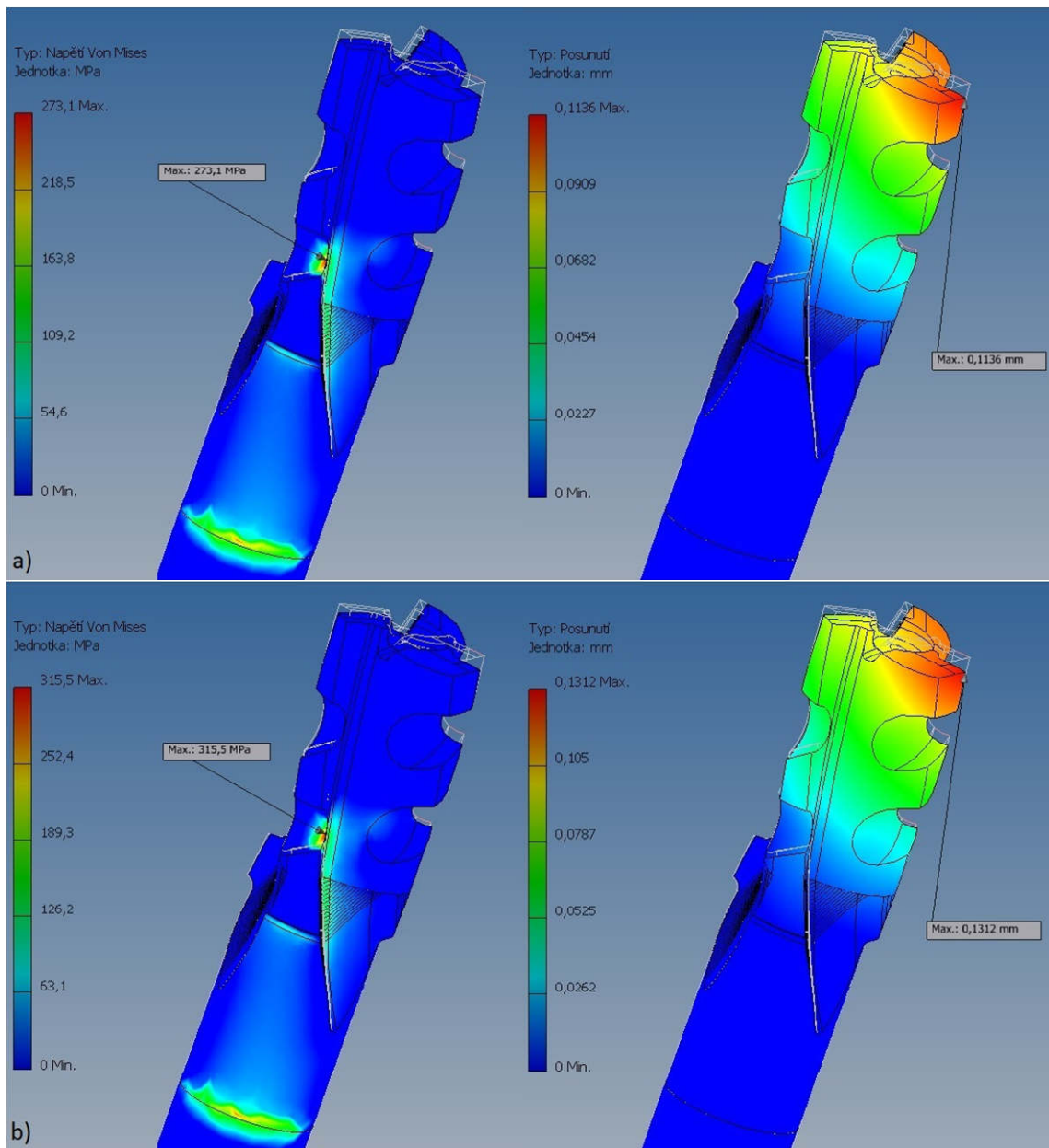
Nejvyšší hodnoty redukovaného napětí byly koncentrovány především v místech kompenzačních břitů (obr. 11.28), vyšší hodnoty je možné pozorovat v místě upnutí nástroje.



Obr. 11.29 Statická analýza napjatosti a deformace nástroje pro frézu RMC s PVD povlakem (Al,Ti)N: a) na začátku testování (po 1. průjezdu); b) na konci testování (po 50. průjezdu).

Maximální hodnota redukovaného napětí podle podmínky von Mises (HMH) nabylo na počátku testování hodnoty 286,2MPa a na konci 306,7MPa. Došlo k nárůstu maximálního napětí o 7,16% při použití nástroje s PVD povlakem (Al,Ti)N (obr. 11.29). Hodnota maximálního napětí je o 52,5MPa nižší než při použití nepovlakovaného nástroje.

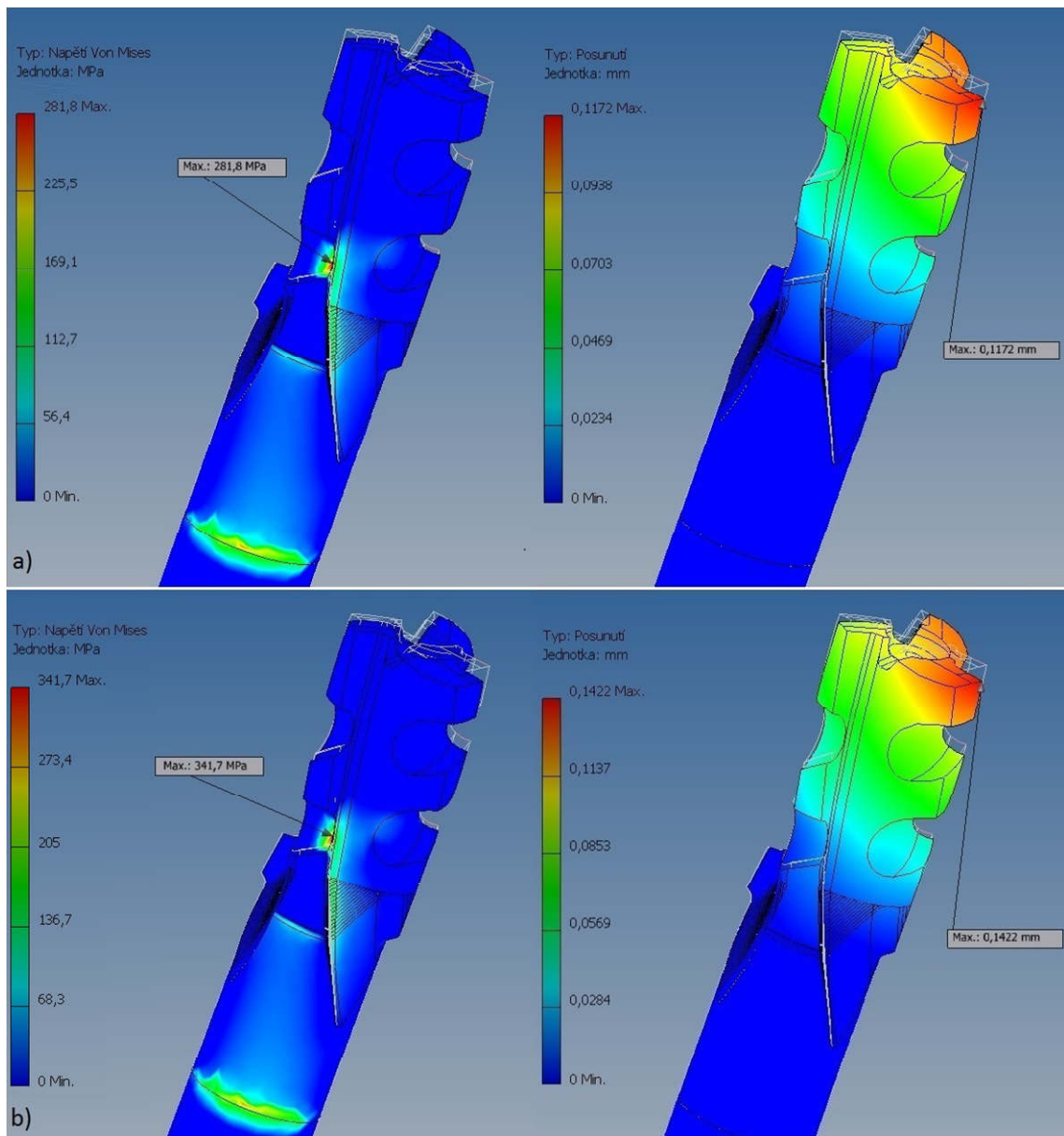
U nástroje s PVD povlakem (Al,Ti)N došlo k nejmenšímu nárůstu redukovaného napětí podle podmínky HMH u všech testovaných nástrojů. Maximální napětí bylo opět koncentrováno především v místech kompenzačních břitů.



Obr. 11.30 Statická analýza napjatosti a deformace nástroje pro frézu RMC s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N: a) na začátku testování (po 1. průjezdu); b) na konci testování (po 50. průjezdu).

Maximální redukované napětí podle podmínky HMM (von Mises) nabylo na počátku testování hodnoty 273,1MPa a na konci 315,5MPa, což představuje 15,53% nárůst. Napětí bylo koncentrováno především v místech kompenzačních břitů (obr. 11.30), vyšší hodnoty je možné pozorovat v místě upnutí nástroje. Na začátku testování bylo dosaženo nejnižší max. hodnoty redukovaného napětí 273,1MPa ze všech testovaných RMC nástrojů.

Hodnota maximálního redukovaného napětí po skončeném testování je opět nižší než u nástroje nepovlakovaného.



Obr. 11.31 Statická analýza napjatosti a deformace nástroje pro frézu RMC s nanokompozitní PVD povlakem nACo®: a) na začátku testování (po 1. průjezdu); b) na konci testování (po 50. průjezdu).

Při použití nástroje s nanokompozitním povlakem nACo® (obr. 11.31) byla maximální hodnota redukovaného napětí podle podmínky von Mises (HMH) na začátku testování 281,8MPa a na konci 341,7MPa. Došlo k nárůstu maximálního redukovaného napětí o 21,25%. U nástroje s nanokompozitním PVD povlakem nACo® došlo k největšímu nárůstu redukovaného napětí podle podmínky HMH v porovnání s ostatními nástroji. Napětí bylo opět koncentrováno především v místech kompenzačních břitů, zvýšené napětí lze také pozorovat v místě upnutí nástroje.

V tab. 11.5 jsou znázorněny dosažené maximální hodnoty redukovaného napětí a posunutí na začátku a konci testování pro všechny testované RMC nástroje, dále také relativní nárůst obou měřených veličin v průběhu testování.

Tab. 11.5 Maximální dosažené hodnoty redukovaného napětí a posunutí.

Nástroj	Hodnota napětí von Mises na začátku testování [MPa]	Hodnota napětí von Mises na konci testování [MPa]	Relativní nárůst napětí von Mises [%]	Hodnota posunutí na začátku testování [mm]	Hodnota posunutí na konci testování [mm]	Relativní nárůst posunutí [%]
RMC bez povlaku	299,3	359,2	20,01	0,1246	0,1495	19,98
RMC + (Al,Ti)N	286,2	306,7	7,16	0,1191	0,1275	7,05
RMC + (Al,Ti,Cr)N	273,1	315,5	15,53	0,1136	0,1312	15,49
RMC + nACo®	281,8	341,7	21,25	0,1172	0,1422	21,33

Z obr 11.28 až obr 11.31 je patrné, že byla nalezena **dvě významná místa** s koncentrací napětí. Tyto místa byly shodné na začátku (po 1. průjezdu) a na konci testování (po 50. průjezdu):

- **kompensační břit** – je namáhaný nejvíce z celého nástroje, důsledkem je ostrá čelní plocha, která tvoří napjatostní vrub,
- **upnutí nástroje** – koncentraci napětí je možné pozorovat v místě upnutí nástroje.

Z analýzy je dále patrné, že došlo k významnému potlačení tahové napjatosti v místě paty zubu při použití všech testovaných RMC nástrojů.

11.11 Analýza opotřebení břítu pomocí elektronového mikroskopu

Elektronová mikroskopie je metoda, která umožňuje zkoumat mikrostrukturu objektů, která je pozorována ve vakuu pomocí elektronového svazku, který vzniká emisí elektronů z katody. Elektrony jsou dále urychlovány k anodě. Svazek elektronů je vhodně upraveným elektrickým, magnetickým nebo elektromagnetickým polem z důvodu dosažení požadovaného zvětšení pozorované oblasti. Elektronový svazek vytváří obraz pomocí interakce s pozorovaným objektem [87, 88].

Elektronovou mikroskopii lze rozdělit podle tvorby obrazu na [87].:

- transmisní (TEM),
- skenovací (SEM).

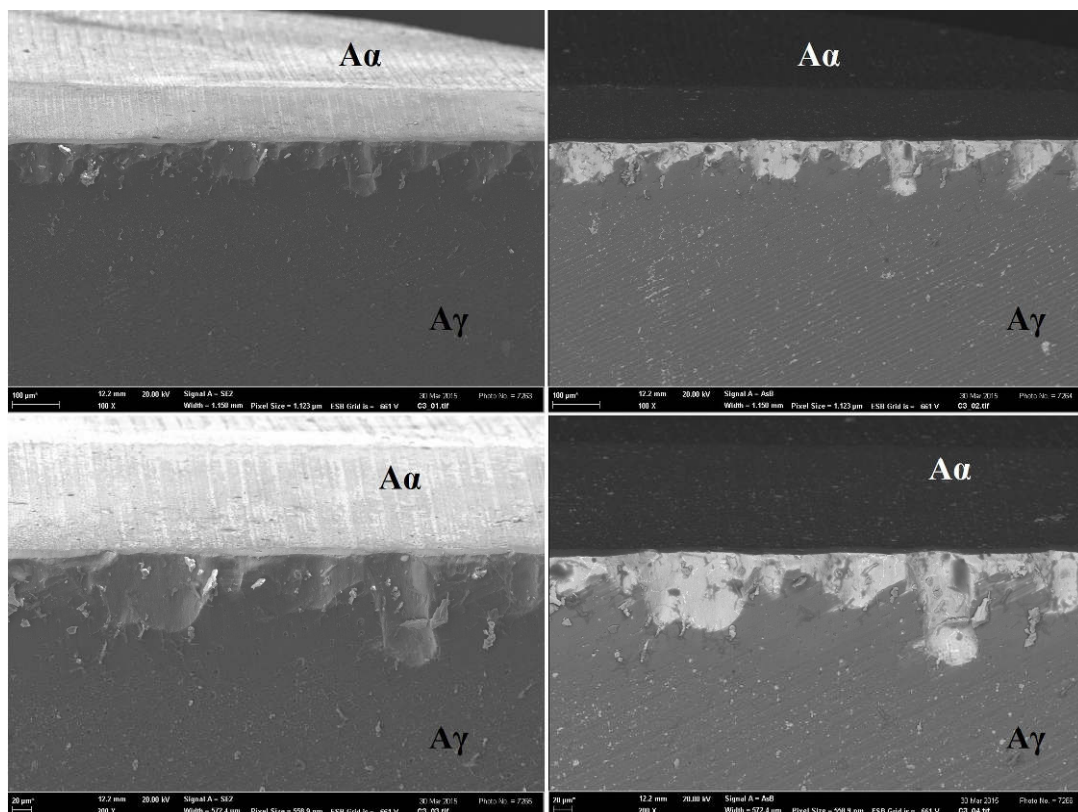
Pro pozorování opotřebení břitů použitých řezných nástrojů bylo použito dvou režimů, pomocí sekundárních (SE2) a pomocí zpětně odražených elektronů (AsB). Pomocí zpětně odražených elektronů lze snadno rozeznat základní materiál (materiál HSSE u nástrojů RMC a HSS Co8 u nástrojů ZPS) od vrstvy naneseného PVD povlaku. Světlá místa zobrazují základní materiál, v těchto místech tedy došlo k odstranění vrstvy povlaku.

Poznámka: Pro analýzu opotřebení nástrojů pomocí elektronové mikroskopie byly vybrány pouze povlakované frézy RMC a ZPS.

Na obr. 11.32 až obr. 11.37 je zobrazeno hřbetní a čelní opotřebení všech testovaných nástrojů s PVD povlaky. Pro zobrazení bylo použito zvětšení 100x a 200x. Pro nástroje s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N (obr. 11.34 a obr. 11.35) a s nanokompozitním povlakem nACo® (obr. 11.36 a obr. 11.37) docházelo k ulpívání obrobeného materiálu na břitu nástroje, které na nástrojích s povlakem (Al,Ti)N není možné pozorovat (obr. 11.32 a obr. 11.33).

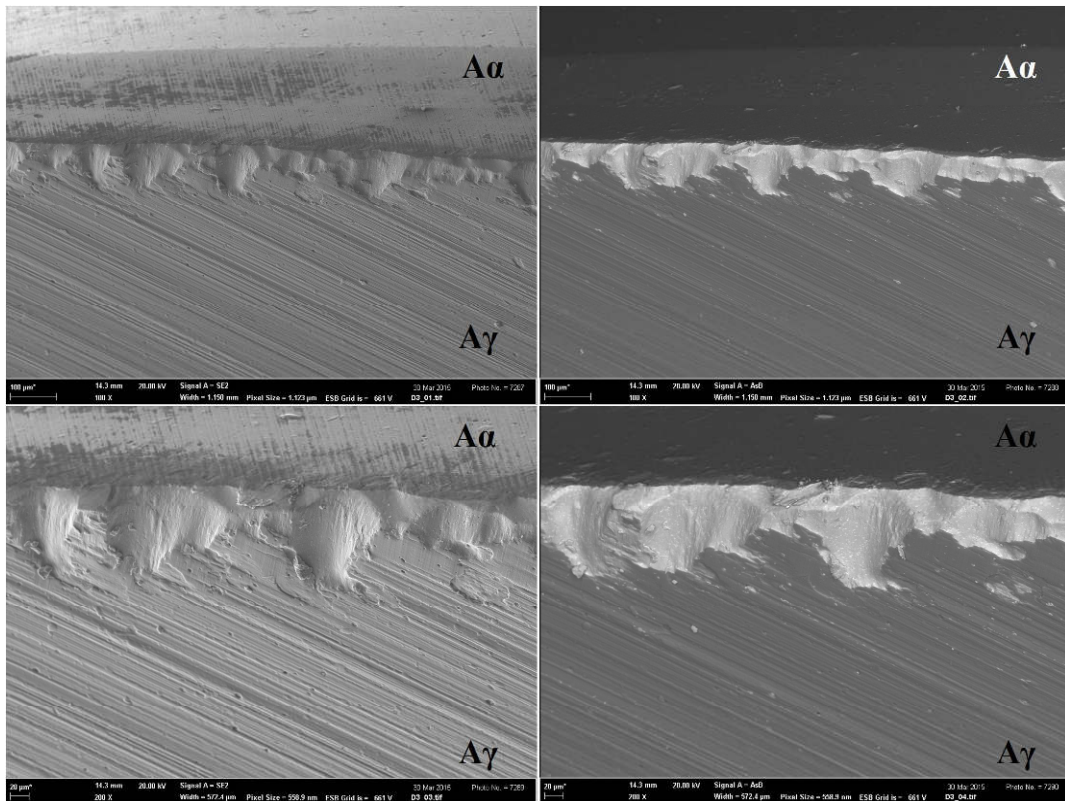
Hřbetní opotřebení (na hřbetu nástroje – označení A α) dosahovalo rovnoměrných hodnot pro všechny břity všech testovaných nástrojů (zobrazen je vždy břit č. 1). Ve všech případech došlo k odloupení naneseného povlaku z ostří nástroje. Opotřebení bylo způsobeno abrazivním třením při kontaktu nástroje s obráběným materiálem.

Dále je patrné zvýšené čelní opotřebení (na čele nástroje – označení A γ) u všech řezných nástrojů, u nástrojů s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N a nanokompozitním povlakem nACo® jsou značné i rýhy na čele, způsobené abrazivním opotřebením a odcházející třískou.

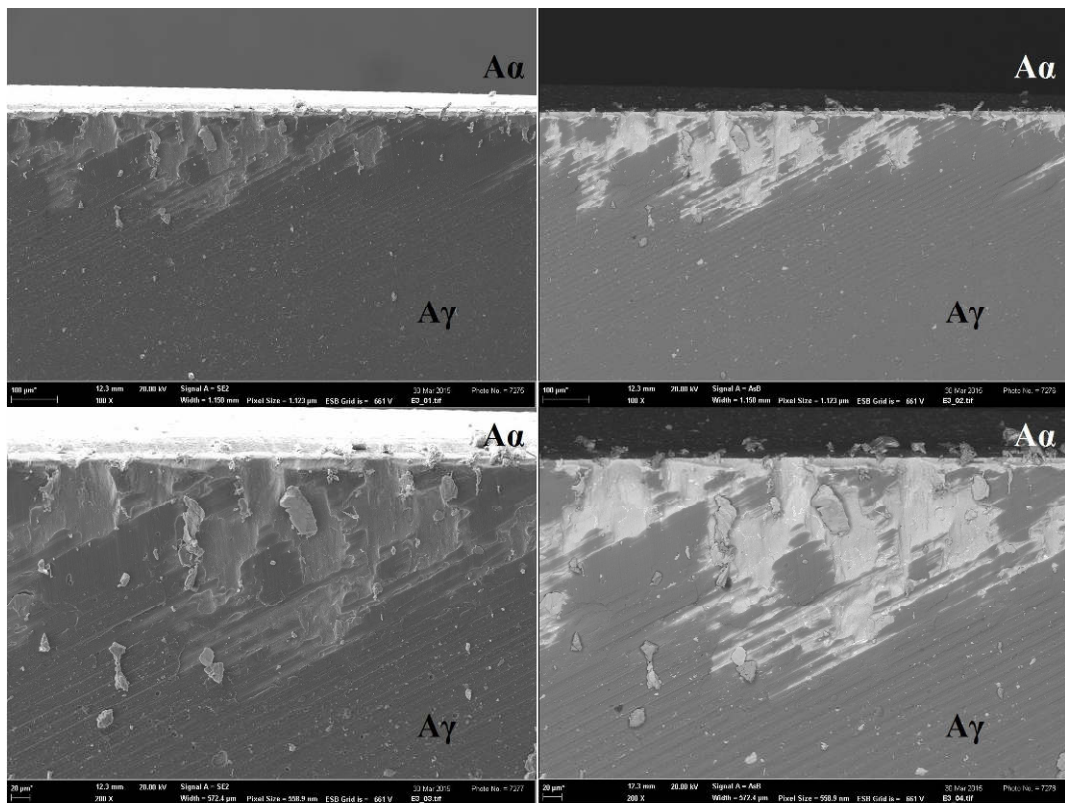


Obr. 11.32 RMC fréza s PVD povlakem (Al,Ti)N po řezné zkoušce.

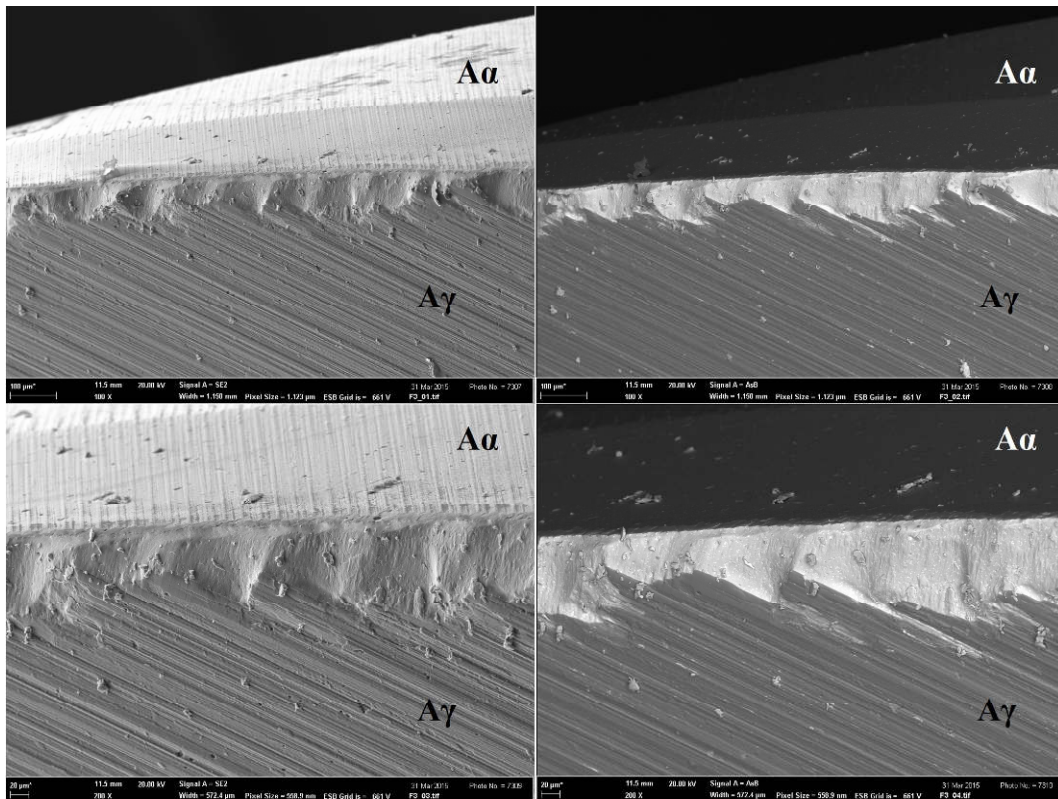
K velkému úbytku povlaku (obr. 11.33) došlo při použití nástroje ZPS s PVD povlakem (Al,Ti)N, které mělo za následek nárůst řezné síly F_c v průběhu testování.



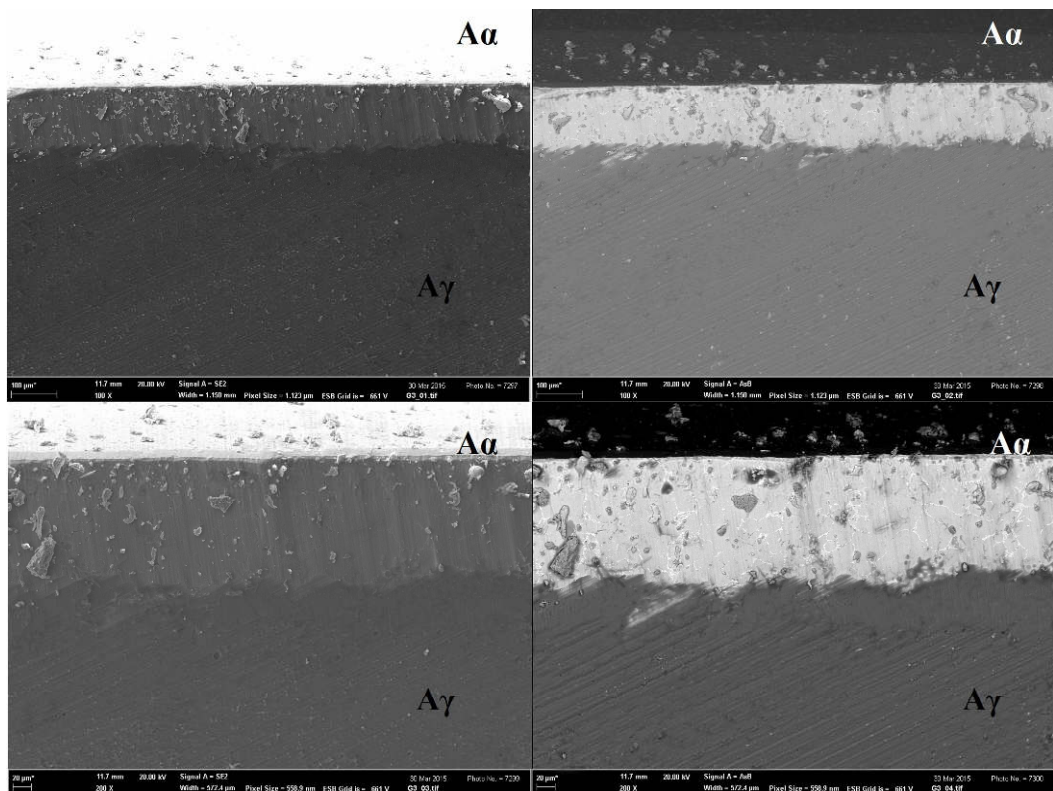
Obr. 11.33 ZPS fréza s PVD povlakem (Al,Ti)N po řezné zkoušce.



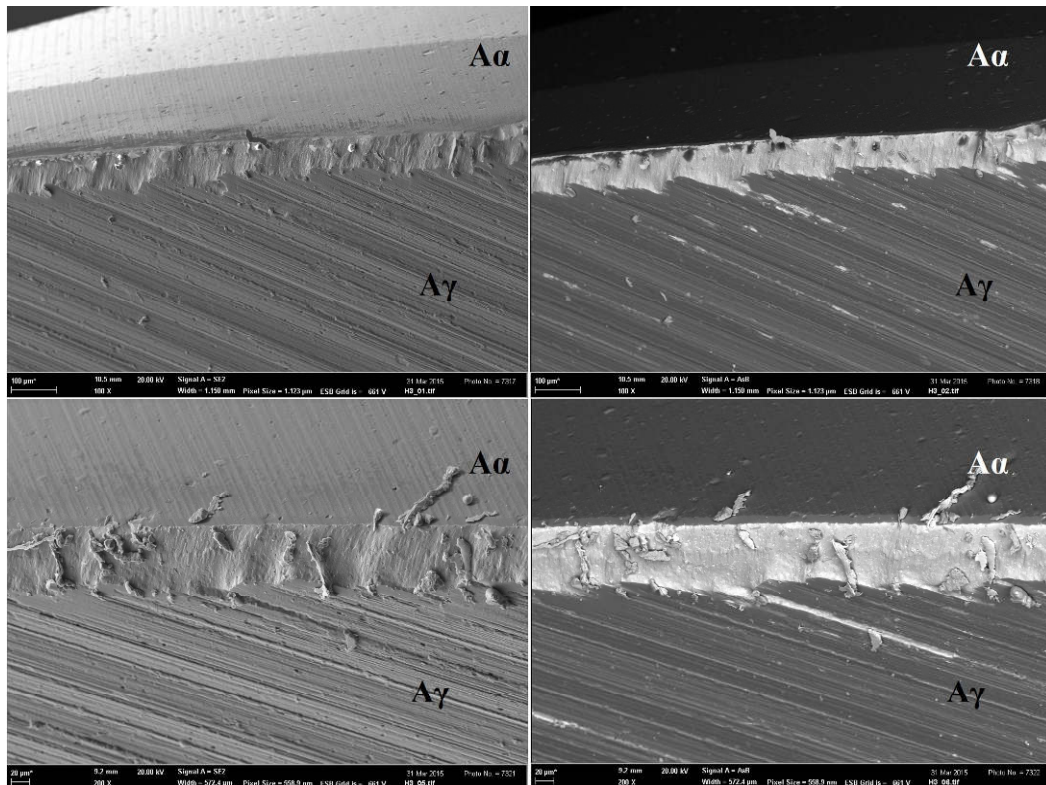
Obr. 11.34 RMC fréza s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N po řezné zkoušce.



Obr. 11.35 ZPS fréza s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N po řezné zkoušce.



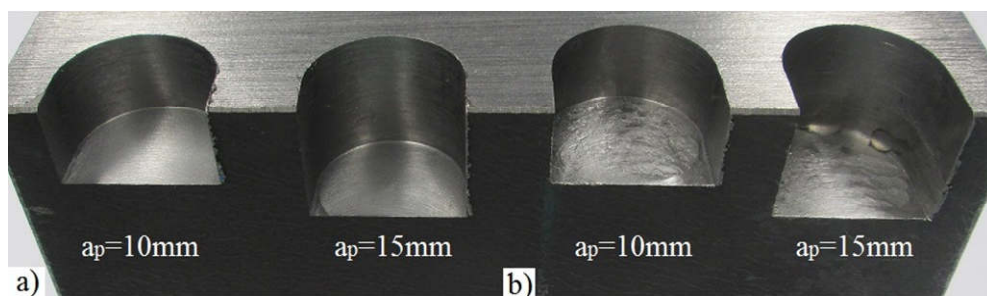
Obr. 11.36 RMC fréza s nanokompozitním PVD povlakem nACo® po řezné zkoušce.



Obr. 11.37 ZPS fréza s nanokompozitním PVD povlakem nACo® po řezné zkoušce.

11.12 Obrábění drážek

Pro zjištění vhodnosti použití nového nástroje RMC pro tvorbu drážek byly provedeny dva průjezdy do materiálu ČSN 41 2050 s využitím procesní kapaliny (řezné podmínky viz tab. 11.4). Šířka záběru ostří a_p byla zvolena 10mm a 15mm.



Obr. 11.38 Obrábění drážek nepovlakovaným nástrojem: a) ZPS; b) RMC.

Z obr. 11.38 je patrné, že nepovlakovaná fréza RMC je vhodná pro hrubování drážek, jelikož pomocí děleného ostří jsou vznikající třísky lépe odváděny z místa řezu. Jelikož se jedná o hrubovací nástroj, není kladen důraz na jakost obrobené plochy, která byla viditelně lepší při použití nepovlakovaného nástroje ZPS.

Pokud bude nástroj RMC konstruován s jedním břitem přes střed, bude nástroj vhodný pro hrubování kapes.

Závěry

Hlavním výsledkem dizertační práce je návrh nového designu frézovacího nástroje (označovaného zkratkou RMC), vyrobeného z rychlořezné oceli v několika provedeních pro hrubovací operace. Tento nástroj byl funkčně úspěšně ověřen pro sérii technických materiálů, za různých řezných podmínek a tento nástroj pod názvem „Fréza s kompenzačními břity pro hrubování“ byl úspěšně přijat Centrem transferu technologií pod číslem 2015/421 k patentování.

Nový nástroj je koncepčně konstruován jako vícebřitá čelní válcová stopková fréza, kdy každý břit nástroje je opatřen tvarovým vybráním, které poskytuje v tomto místě dva protilehlé kompenzační břity s příznivým účinkem na namáhání nástroje. Nejednalo se tedy pouze o drobnou technickou úpravu stávajících normovaných fréz s lamačem třísek nebo přerušením břitu, ale o novou koncepci řezného nástroje, kterou lze považovat za původní.

Pro konstrukci nástroje v softwaru Autodesk Inventor byla zvolena metoda simulace obrábění. Nástroj byl vyroben pomocí technologie přeného lití, kdy po odlití prototypu byly funkční plochy nástroje přebroušeny, následně byl nástroj tepelně zpracován a deponován třemi typy PVD povlaků - (Al,Ti)N; (Al,Ti,Cr)N a nanokompozitní povlak nACo®.

Z provedených řezných zkoušek při sousledném a nesousledném frézování různorodých materiálů (umělé dřevo, hliníkové slitiny, oceli) vyplynulo:

- řezná síla F_c dosahovala nižších hodnoty při použití nástroje ZPS (DIN 844, ISO 1641, ČSN 22 2130) při obrábění všech materiálů (s výjimkou umělého dřeva SikaBlock M450) v porovnání s nástrojem RMC,
- při sousledném frézování umělého dřeva SikaBlock M450 nástrojem RMC bylo naopak dosaženo nižší hodnoty (rozdíl cca 10%) řezné síly F_c a celkové síly F v porovnání s nástrojem ZPS,
- vyšší hodnoty řezné síly F_c jsou způsobeny především děleným ostřím nástroje RMC, které způsobuje větší rázy při najíždění jednotlivých zubů do záběru. Značný vliv na velikost řezné síly má i směr natočení a úhel stoupání šroubovice λ_s ,
- obrábění obou hliníkových slitin (AlCu4MgSi a AlCu9Si(Fe)) vykazovalo téměř shodné průběhy silového zatížení při použití obou nástrojů (vyšší hodnoty vykazoval nástroj RMC),
- frézování obou druhů ocelí (ČSN 41 2050 a ČSN 41 5142) probíhalo za použití procesní kapaliny. Z průběhů jednotlivých silových složek je patrný stabilní proces obrábění u obou testovaných nástrojů, s výjimkou nesousledného frézování nástrojem ZPS, kde rozptýl hodnot silových složek F_c a F_{FN} byl pravděpodobně způsobený ulpívající se třískou na vzniklou obrobenou plochu obrobku,
- problém ulpívajících se dlouhých třísek u nesousledného frézování obou typů ocelí byl u nástroje RMC potlačen děleným ostřím. Vyšší hodnoty jednotlivých

silových složek (v porovnání s nástrojem ZPS) je možné opět přičíst dělenému ostří, natočení a úhlu stoupání šroubovice,

- jakost obrobené plochy byla lepší při sousledném frézování (pro oba testované nástroje), které také vykazovalo i menší hlučnost. U sousledného frézování hodnota řezné síly F_c převyšovala ve všech případech hodnotu normálové síly F_{cN} , z toho důvodu byl nástroj vtahován do řezu a nedocházelo ke zhoršení kvality obrobené plochy.

Z průběhu silových zatížení byla pro dlouhodobé testování zvolena technologie sousledného frézování za použití procesní kapaliny, obráběným materiálem byla ušlechtilá konstrukční ocel ČSN 41 2050.

Z dat získaných při dlouhodobém obrábění oceli ČSN 41 2050 bylo dosaženo těchto výsledků:

- z průběhů silových zatížení je opět patrné, že dosažené hodnoty řezné síly F_c na začátku i na konci testování dosáhly vyšších hodnot při použití povlakovaných nástrojů RMC v porovnání s povlakovanými nástroji ZPS. Vyšší hodnoty byly opět způsobeny děleným ostřím nástroje, natočením šroubovice a úhlem stoupání šroubovice,
- všechny testované nástroje vydržely všech 50. průjezdů materiálem, to odpovídá celkovému strojnímu času $t=46,25\text{min}$.
- nejnižší relativní nárůst řezné síly F_c dosáhla fréza ZPS s PVD povlakem (Al,Ti,Cr)N (1,%), naopak nejvyšší nárůst byl zaznamenán při použití nástroje ZPS s nanokompozitním povlakem nACo® (28%),
- nejnižší hodnoty řezné síly na počátku testování dosáhl nástroj ZPS s povlakem (Al,Ti)N ($F_c=622\text{N}$), ale v průběhu testování a růstu opotřebení nástroje byl zaznamenán druhý nejvyšší relativní nárůst F_c (27,5%)
- jako velice vhodné PVD povlaky, deponované na nástroje RMC, se ukázaly povlaky (Al,Ti)N (7% nárůst F_c v průběhu testování) a (Al,Ti,Cr)N (9% nárůst),
- jako nejméně vhodný deponovaný povlak se ukázal nanokompozitní povlak nACo® u obou testovaných nástrojů (RMC i ZPS). U obou testovaných nástrojů bylo dosaženo více než 20% nárůstu řezné síly F_c v průběhu testování (24% u frézy RMC a 28% u frézy ZPS),
- hřbetní opotřebení měřené pomocí kritéria VB bylo na všech třech břitech všech testovaných nástrojů rovnoměrné,
- nejvyšších hodnot opotřebení dosáhly nepovlakované nástroje RMC ($VB=0,197\text{mm}$) a ZPS ($VB=0,140\text{mm}$), naopak nejnižší hodnota byla zaznamenána pro nástroj ZPS s povlakem (Al,Ti,Cr)N ($VB=0,063\text{mm}$),
- rozsah neodlehých hodnot řezné síly F_c v průběhů testování u RMC nástrojů s PVD povlaky (Al,Ti)N a (Al,Ti,Cr)N nenabyl výraznějších změn, podobně také při použití nástroje ZPS s povlakem (Al,Ti,Cr)N. Výraznější změny byly zaznamenány u nepovlakovaných nástrojů RMC i ZPS.

Pro nově navrženou geometrii stopkových fréz RMC byla z dat získaných při dlouhodobém obrábění oceli ČSN 41 2050 provedena pevnostní analýza, ze které plyne:

- po provedení pevnostní analýzy napjatosti a deformace bylo zjištěno, že bylo dosaženo přibližně stejných hodnot redukovaného napětí podle podmínky HMH a hodnot posunutí nástroje pro všechny bříty nástroje RMC,
- byla nalezena dvě významná místa s koncentrací napětí, v místě kompenzačních břitů a v místě upnutí nástroje,
- maximální dosažená hodnota redukovaného napětí podle podmínky von Mises dosáhla hodnoty 299,3MPa (na začátku testování) a 359,2MPa na konci testování u nepovlakovaného nástroje RMC,
- nejmenšího nárůstu redukovaného napětí podle podmínky HMH (von Mises) v průběhu testování bylo dosaženo při použití nástroje s PVD povlakem (Al,Ti)N.

Pomocí elektronové mikroskopie bylo zkoumáno opotřebení povlakovaných RMC i ZPS nástrojů, ze které plyne:

- došlo k částečnému opotřebení povlaku na všech testovaných nástrojích, které je dobře viditelné v režimu zpětně odražených elektronů (AsB), na pořizovaných fotografiích je více patrné čelní opotřebení nástroje.
- hřbetní opotřebení u všech testovaných nástrojů bylo pravděpodobně způsobené abrazivním otěrem,
- čelní opotřebení bylo způsobeno odváděnou třískou z místa řezu. Na čelních plochách jsou také patrné rýhy na čele, především u nástrojů ZPS s nanokompozitním povlakem nACo® a obou nástrojů s povlakem (Al,Ti,Cr)N.

Perspektiva dalších prací

Pro konstrukci nástroje byla zvolena metoda simulace obrábění, která ukazuje rozvinutí vzniklé vybroušené drážky po šroubovici. Z důvodu složitého tvaru nástroje (výskyt kompenzačních břitů) byla zvolena výroba nástroje pomocí technologie přesného lití. Šroubovitou drážku by bylo možné vyrobit i pomocí speciálního tvarového kotouče (jeho nutná konstrukce a následná nákladná výroba), ale jelikož se jednalo teprve o výrobu prototypu, který byl posléze testován, byla zvolena technologie přesného lití.

Další možností je konstrukce nástroje s jedním břitem přes střed, aby bylo možné zavrtání nástroje do obráběného materiálu, posouzení vhodnosti užití nástroje RMC pro frézování drážek a kapes.

Při testování nástroje RMC byly naměřeny vyšší hodnoty řezné síly F_c i celkové síly F v porovnání s nástrojem ZPS, které byly pravděpodobně způsobeny děleným ostřím nástroje, které způsobuje větší rázy při najíždění nástroje do obrobku. Vznikající rázy lze také ovlivnit pomocí úhlu stoupání šroubovice. Perspektivou další konstrukce je právě možná změna úhlu stoupání šroubovice tak, aby nástroj lépe zabíhal do záběru (nastavení vyšší hodnoty).

Další perspektivou do budoucna je depozice vhodného PVD povlaku (multivrstvé, gradientní systémy, DLC vrstvy, atd.), aby bylo možné nástroj otestovat při frézování těžkoobrobitelných materiálů (např. titanových slitin). Při dlouhodobých řezných zkouškách byly testovány pouze monovrstvé povlaky na bázi Al-Ti a nanokompozitní povlak nACo®.

Velký potenciál představuje implementace vnitřního chlazení, protože nástroj má zlepšený odvod třísek, což se může s výhodou použít při zhoršených podmínkách odvodu třísek, jako například frézování kapes, vybrání, dutin, atd.

Zajímavou oblastí bude studium integrity obrobeného povrchu, zejména ve spojitosti s dokončovacím obráběním, neboť nelze vyloučit synergetický vliv výrazně tlakového obrábění s přesným obrobením povrchů.

Reference

- [1] KESL, M. Rychlořezné ocele stále aktuální. *MM Průmyslové spektrum*. 2007[online], [vid. 2013-09-24], Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/-rychlomezne-occele-stale-aktualni>.
- [2] FREMUNT, P., KREJČÍK, J., PODRABSKÝ, T. *Nástrojové oceli*. 1.vyd. Brno: Dům techniky, 1994. 230s.
- [3] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [4] SPROUL, W. Physical vapor deposition tool coatings. *Surface and Coatings Technology*. 1996, vol. 81, issue 1, s. 1-7. DOI: 10.1016/0257-8972(95)02616-9. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0257897295026169>.
- [5] CSELLE, T., CODDET, O., HOLUBÁŘ, P. Počítačová simulace růstu PVD povlaků a nová řada trojvrstevných povlaků. *MM Průmyslové spektrum.*, [online], [vid. 2013-09-25], Dostupné z:<http://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-rustu-pvd-povlaku-a-nova-rada-trojvrstevnych-povlaku.html>.
- [6] ČÍP, J., ŠTOKSA, L. Doporučené oteruvzdorné povlaky pro HSS a jejich aplikační vymezení. *Frézování*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1999, s.21.-22. ISBN 80-214-1425-1.
- [7] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [8] FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [9] NĚMEC, K. *Nástrojové oceli*. [online]. Studijní opory předmětu Struktura a vlastnosti materiálů. Brno: VUT - FSI, Ústav materiálových věd a inženýrství. 2008, 31s. Dostupné z:<http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-zimni-semestr>.
- [10] *Nástrojové oceli vyráběné práškovou metalurgií*. [online]. [vid. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojovky/prasky/>.
- [11] HLUCHÝ, M. *Strojírenská technologie 2 - 2. díl: Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1999, 176 s. ISBN 80-718-3127-1.
- [12] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1999, 350 s. ISBN 80-720-4130-4.
- [13] *Zpracování nástrojových ocelí* [online]. [vid. 2013-10-03]. Dostupné z: <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technickaprirucka/nastrojovky/-zpracovaniNO/>.

- [14] JEŽEK, J., VOBOŘIL, J. *Elektronová metalografie jemnozrnných fází*. Praha: Academia, 1972, 218 s.
- [15] KOCMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [16] PÍŠKA, M., POLZER, A. Studie řezivosti hrubovacích fréz z produkce ZPS-FN, a.s., Zlín. *Sborník odborné konference Frézování III*. Brno: FSI VUT v Brně, 2003. s.145-158. ISBN 80-214-2436-2.
- [17] 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.
- [18] MATTOX, D. *Handbook of Physical vapor deposition (PVD) processing: principles, technology, and applications*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2010, xlvii, 746 s. ISBN 978-0-81-552037-5.
- [19] 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.
- [20] SREEHARSHA, K. *Principles of Physical vapor deposition of thin films*. Amsterdam: Elsevier, 2006, xi, 1160 s. ISBN 00-804-4699-X.
- [21] MOLLER, P., NIELSEN, L. *Advanced surface technology: volume 1*. 1.vyd. Denmark, 2013, 582s. ISBN 978-87-92765-15-4.
- [22] CARVALHO, N. *Low friction and wear resistant coatings: microstructure and mechanical properties*. Groningen: Groningen University Press, 2001. xxiv., 482 s. ISBN 90-367-1378-1.
- [23] KELLY, P. ARNELL, R. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*. 2000, vol. 56, issue 3, pp. 159-172. DOI: 10.1016/S0042-207X(99)00189-X
- [24] MATTOX, D. Vacuum deposition processes. *Products Finishing*. 1999 [online]. [vid. 2013-09-28]. Dostupné z:<http://www.pfonline.com/articles/vacuum-deposition-processes>.
- [25] NORDIN, M., LARSSON, M., HOGMARK, S. Wear resistance of multilayered PVD TiN/TaN on HSS. *Surface and Coatings Technology*. 1999, 120-121, pp. 528-534. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00493-4.
- [26] MUBARAK, A., HAMZAH, E., TOFF, M. Review of Physical Vapour Deposition (PVD)- Technigues for hard coating. *Jurnal mekanikal*. 2005. č. 20, pp. 42-51 [online]. [vid. 2013-09-28]. Dostupné z:<http://www.fkm.utm.my/~mekanika/Issue%2020/review%28esah-jilid20%29.pdf>.

- [27] SINGH, K., LIMAYE, P., SONI, N., at all. Wear studies of (Ti–Al)N coatings deposited by reactive magnetron sputtering. *Wear*. 2005, vol. 258, 11-12, pp. 1813-1824. DOI: 10.1016/j.wear.2004.12.023.
- [28] HAN, J., YOON, J., KIM, H., at all. High temperature wear resistance of (TiAl)N films synthesized by cathodic arc plasma deposition. *Surface and Coatings Technology*. 1996, vol. 86-87, pp. 82-87. DOI: 10.1016/S0257-8972(96)02964-7.
- [29] VETTER, J., KRUG, T., VON DER HEIDE, V. AlTiCrNO coatings for dry cutting deposited by reactive cathodic vacuum arc evaporation. *Surface and Coatings Technology*. 2003, vol. 174-175, pp. 615-619. DOI: 10.1016/S0257-8972(03)00349-9.
- [30] CHANG, Y., YANG, S., WANG, D. Structural and mechanical properties of AlTiN/CrN coatings synthesized by a cathodic-arc deposition process. *Surface and Coatings Technology*. 2006, vol. 201, issue 7, pp. 4209-4214. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.08.062.
- [31] JAKUBÉCZYOVÁ, D., HVIZDOŠ, P., SELECKÁ, M. Investigation of thin layers deposited by two PVD techniques on high speed steel produced by powder metallurgy. *Applied Surface Science*. 2012, vol. 258, issue 12, pp. 5105-5110. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.01.138.
- [32] HUMÁR, A. *Technologie I - Technologie obrábění – 1. část*, [online] Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie, 2003, [vid. 2013-10-21], dostupné z: http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie_I.pdf.
- [33] MUROTANI, T., HIROSE, H., SASAKI, T. at all. Study on stress measurement of PVD-coating layer. *Thin Solid Films*. 2000, 377-378, pp. 617-620. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)01280-3.
- [34] HOLUBÁŘ, P., ŠÍMA, M., ZINDULKA, O. Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM Průmyslové spektrum*. září 2005, č. 9. s. 70-72. Praha: SEND Předplatné s.r.o., 2005. ISSN 1212-2572.
- [35] OHRING, M. *Materials science of thin films: deposition and structure*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2002. ISBN 01-252-4975-6.
- [36] *Mycí linka pro čištění nástrojů před povlakováním používaná společností SHM s.r.o.* SHM s.r.o. Česká Republika [online], [vid. 2013-10-23]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/o-spolecnosti/virtualni-prohlidka/myti/>.
- [37] *Stripping povlaků z HSS nástrojů*. SHM s.r.o. Česká Republika [online], [vid. 2013-10-23]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/stripping/>.

- [38] ŠÍMA, M., JANKŮ, R. Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlakováním. *MM Průmyslové spektrum*, 2007[online], [vid. 2013-10-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mech-anicka-uprava-monolitnich-nastroju-pred-pvd-povlaky.html>.
- [39] Současnost a trendy povlakování technologií PVD. *MM Průmyslové spektrum*, 2003.[online]. [vid.2013-10-24].Dostupné z:<http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>.
- [40] HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M., RŮŽIČKA, M. Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. *MM Průmyslové spektrum*. září 2004 [online]. [vid. 2013-10-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-pvd-povlaky-pro-rezne-aplikace-a-tvareni.html>.
- [41] *Virtuální prohlídka společnosti Liss*. Liss a.s., Rožnov pod Radhoštěm, Česká Republika [online], [vid. 2013-11-01]. Dostupné z: <http://www.liss.cz/>.
- [42] *Virtuální prohlídka společnosti SHM*. SHM s.r.o., Šumperk, Česká Republika [online], [vid. 2013-10-23]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz>.
- [43] *Přehled nabízených povlaků společnosti Liss a.s.* Liss a.s. Česká Republika [online], [vid. 2013-11-01]. Dostupné z: <http://www.liss.cz/nabidka.php?podskupina=4>.
- [44] *PVD povlaky nanášené na HSS frézy společnosti ZPS*. ZPS - Frézovací nástroje Zlín, Česká Republika [online]. [vid. 2013-11-06]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/>
- [45] FOREJT, M., HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANÍČEK, L. Experimentální metody: Syllabus [online]. Brno, 2003 [vid. 2013-11-11]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/experimentalni_metody_cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf>.
- [46] *Virtuální prohlídka společnosti ZPS - Frézovací nástroje* ZPS - Frézovací nástroje Zlín, Česká Republika [online]. [vid. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/>.
- [47] *Nástrojové materiály pro výrobu fréz*. ZPS - Frézovací nástroje, Zlín, Česká Republika [online]. [vid. 2013-11-14]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/html/materialy-pouzivane-k-vyrobe-frez-22.html>.
- [48] *Katalog nástrojů společnosti ZPS - Frézovací nástroje*. ZPS - Frézovací nástroje, Zlín, Česká Republika [online]. [vid. 2013-11-14]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/katalog-frez/>.
- [49] *Virtuální prohlídka společnosti Monometal nástroje*. Monometal nástroje s.r.o., Mošnov, Česká Republika. [online]. [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.monometal.com/>.

- [50] *Virtuální prohlídka společnosti Carbide*. Carbide s.r.o., Měřín, Česká Republika. [online]. [vid. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.carbide.cz/>.
- [51] *Virtuální prohlídka společnosti Kalenast*. Kalenast s.r.o., Mohelnice, Česká Republika. [online]. [vid. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.kalenast.cz/>.
- [52] *Virtuální prohlídka společnosti EMUGE-FRANKEN*. EMUGE-FRANKEN servisní centrum, s.r.o., Brno, Česká Republika. [online]. [vid. 2013-11-16]. Dostupné z: <http://www.emugefranken.cz/>.
- [53] *Typy geometrií a úhly stoupání šroubovice HSS stopkových fréz*. EMUGE-FRANKEN servisní centrum, s.r.o. Brno, Česká Republika. [online]. [vid. 2013-11-16]. Dostupné z: <http://www.emugefranken.cz/index.php?menu=77>.
- [54] *Virtuální prohlídka společnosti Gühring*. Gühring, s.r.o., Líně – Sulkov, Česká Republika [online]. [vid. 2013-11-17]. Dostupné z: <http://www.guhring.cz/>.
- [55] *Virtuální prohlídka společnosti Fraisa*. Fraisa SA, Bellach, Švýcarsko. [online]. [vid. 2013-11-17]. Dostupné z: <http://www.fraisa.com>.
- [56] *Virtuální prohlídka společnosti Cromwell*. Cromwell s.r.o, Praha, Česká Republika [online]. [vid. 2013-11-17]. Dostupné z: <http://www.cromwell.cz/index.html>.
- [57] KIM, J., PARK, J., KO, T. End mill design and machining via cutting simulation. *Computer-Aided Design*. 2008, vol. 40, issue 3, pp. 324-333. ISSN 00104485. DOI: 10.1016/j.cad.2007.11.005.
- [58] MADAJ, M., PÍŠKA, M., ZOUHAR, J. *Moderní metody konstruování řezných nástrojů pomocí systémů CAD/CAM/CAE*: Syllabus. [online]. [vid. 2013-11-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/madaj/FRVS2009/pdf_samostatny/FRVS2009_2636-2009_KOMPLET.pdf.
- [59] TANDON, P., RAJIK KHAN, M. Three dimensional modeling and finite element simulation of a generic end mill. *Computer-Aided Design*. 2009, vol. 41, issue. 2, pp. 106-114. ISSN 00104485. DOI: 10.1016/j.cad.2009.01.005.
- [60] *Řezné podmínky pro obrábění umělého dřeva SikaBlock M450*. [online]. [vid. 2013-11-25]. Dostupné z: http://www.scabro.com/assets/files/Sika%20TDS/-Milling_Parameters_eng_1.pdf.
- [61] *Nastavení řezných podmínek pro frézování umělého dřeva*. [online]. [vid. 2013-11-25]. Dostupné z: <http://www.scabro.com/assets/files/Sika%20blokmateri-alen%20TDS/Freesgegevens%20SikaBlock%202011.pdf>.
- [62] DVOŘÁČEK, J., MATUŠKA, M., SEDLÁK, J. On the application of PVD hard coatings for milling of hardened steel. In *Newtech 2011*. s. 93-98. ISBN 978-80-214-4267-2.

- [63] KO, S.-L. Geometrical analysis of helical flute grinding and application to end mill. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*. 1994, vol. 22, pp.165-172.
- [64] KIM, Y., KO, S. Development of design and manufacturing technology for end mills in machining hardened steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, vol. 130-131, pp. 653–661. ISSN 0924-0136, [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00728-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00728-8).
- [65] KO, S., PHAM, T., KIM, Y. Visualization proces for design and manufacturing of end mills. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005 vol. 3613, pp. 1133–6. ISSN 0302-974. DOI:10.1007/11539506_141
- [66] KALDOR, S., RAFAEL, A., MESSINGER, D. On the CAD of Profiles for Cutters and Helical Flutes – Geometrical Aspects, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1988, vol. 37, issue 1, pp. 53-56, ISSN 0007-8506, [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61584-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61584-4).
- [67] KUMAR, S., TANDON, P., DHANDE, S. A generic mathematical model of single point cutting tools in terms of grinding parameters, *Applied Mathematical Modelling*. 2011, vol. 35, issue 10, pp. 5143-5164, ISSN 0307-904X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.04.017>.
- [68] TANDON, P., KHAN, M., Three dimensional modeling and finite element simulation of a generic end mill, *Computer-Aided Design*. 2009, vol. 41, issue 2, pp. 106-114, ISSN 0010-4485, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2009.01.005>.
- [69] KUMAR, S., TANDON, P., DHANDE, S. Geometric modeling and validation of twist drills with a generic point profile. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, vol. 36, issue 6, pp. 2384-2403, ISSN 0307-904X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.08.034>.
- [70] TANDON, P., GUPTA, P., DHANDE, S. Geometric Modeling of End Mills. *Computer-Aided Design and Applications*. 2005, vol. 2, issue. 1-4, pp. 57-65. DOI:10.1080/16864360.2005.10738353.
- [71] TANDON, P., GUPTA, P., DHANDE, S. Geometric Modeling of Single Point Cutting Tool Surfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, vol. 22, issue 1-2, pp. 101-111. DOI: 10.1007/s00170-002-1447-3.
- [72] *Virtuální prohlídka 3D tiskáren společnosti Stratasys*. [online]. [vid. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/>.
- [73] *Mechanické vlastnosti termoplastu ABS plus*. [online]. [vid. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.evektor.cz/Data/Sites/1/Files/pdf/MS-ABS-M30-FORTUS.pdf>.
- [74] PÍŠKA, M. *Speciální technologie obrábění*. 1.vyd.. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

- [75] *Silikonové pryskyřice používané pro výrobu silikonových forem.* [online]. [vid. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.ebalta.cz/cz/katalog-produktu/silikonovy/silastic-t-4>.
- [76] *Virtuální prohlídka společnosti Blayson – výrobce slévárenských vosků.* [online]. [vid. 2014-12-02]. Dostupné z: <https://www.blayson.com/>.
- [77] *Virtuální prohlídka společnosti Slévárna přesných odlitků.* SPO s.r.o., Zlín, Česká Republika. [online]. [vid. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.spozlin.cz/cs/>.
- [78] HERMAN, A. *Přesné lití na vytavitelný model.* [online] Sylabus. Praha: ČVUT-FSI, Ústav strojírenské technologie, 2005, [vid. 2014-12-11], Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>.
- [79] HORÁČEK, M. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu.* [online] Sylabus. Praha: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenské technologie. 2009, [vid. 2014-12-11], Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>.
- [80] *Chemické složení obráběné hliníkové slitiny AlCu4MgSi.* [online]. [vid. 2014-12-04]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_Composition_eu.php?name_id=1035
- [81] *Chemické složení HSS oceli ČSN 19 830.* [online]. [vid. 2014-12-04]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/printpdf/produkty/nastrojova-ocel-13343>.
- [82] *Strojový park společnosti ZPS-Frézovací nástroje.* [online]. [vid. 2015-01-29]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/vyrobni-stroje/>.
- [83] *Chemické složení materiálu AlSi9Cu3(Fe).* Feron a.s. [online]. [vid. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/detail.php?id=32577>.
- [84] *Chemické složení oceli 12050 (1.1191).* Bolzano s.r.o. [online]. [vid. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-c45>.
- [85] *Chemické složení oceli 15 142 (1.7227).* Bolzano s.r.o. [online]. [vid. 2015-03-27]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_42CrMo4.pdf.
- [86] ŠTRAJBL, J. *Obráběcí stroje 1971.* Vyd.1. Praha: SNTL, 1972. 620s.

- [87] *Elektronová mikroskopie*. [online]. [vid. 2015-04-03]. Dostupné z: http://www.paru.cas.cz/lem/bak/1_1.htm.
- [88] *Fyzikální podstata elektronové mikroskopie*. [online]. [vid. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://web.natur.cuni.cz/~parazit/parpages/mikroskopickatechnika/elektronova.htm>.
- [89] *Použité slévárenské písky*. [online]. [vid. 2014-12-06]. Dostupné z: <http://www.glassand.eu/pisky/techpisky.pdf>.

Autorovy publikace k danému tématu

FIALA, Z.; PÍŠKA, M.; JAROŠ, A. On the analysis of the sound spectrum at machining of the glass- polyester composite material. *MM Scinece Journal*, 2014, roč. 7, č. 1, s. 1-4. ISSN: 1805- 0476.

JAROŠ, A.; KOLÁŘ, L.; FIALA, Z. The development of new HSS milling cutter with negative geometry for roughing operations. In *ERIN 2014, 8th International Conference for Young Researchers and Ph.D. Students; Proceedings of Abstracts*. 1. Litera Brno: Brno University of Technology, 2014. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-4931- 2.

JAROŠ, A.; FIALA, Z.; DVOŘÁČEK, J. Investigation of the influence of AlTiCrN coating for dry milling of construction steel 1. 8159. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012*. 1. Hradec Králové: Magnanimitas, 2012. s. 3475-3482. ISBN: 978-80-905243-3- 0.

JAROŠ, A.; FIALA, Z. Porovnání povlakovaných a nepovlakovaných VBD pro čelní frézování zušlechtěné oceli. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012*. 1. Hradec Králové: Magnanimitas, 2013. s. 3225-3232. ISBN: 978-80-87952-00- 9.

FIALA, Z.; JAROŠ, A.; DVOŘÁČEK, J., Influence of tool wear on sound frequency of milling process. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012*. 1. Hradec Králové: Magnanimitas, 2012. s. 3483-3489. ISBN: 978-80-905243-3- 0.

FIALA, Z.; JAROŠ, A.; SLANÝ, M. Vývoj měrné řezné síly s rozvíjejícím se opotřebením řezného nástroje. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2013*. Hradec Králové: Magnanimitas, 2013. s. 3429-3438. ISBN: 978-80-87952-00- 9.

FIALA, Z.; JAROŠ, A.; KOLÁŘ, L. The analysis of specific cutting forces at machining of composite materials. In *ERIN 2014, 8th International Conference for Young Researchers and Ph.D. Students; Proceedings of Abstracts*. 1. Litera Brno: Brno University of Technology, 2014. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-4931- 2.

Přijaté články čekající na vydání

SEDLÁK, J., SLANÝ, M., FIALA, Z., JAROŠ, A. Production Method of Implant Prototype of Knee-Joint Femoral Component. *Manufacturing Technology*, 2015. ISSN: 1213-2489.

FIALA, Z., JAROŠ, A., SEDLÁK, J., KOLÁŘ, L., BLAŽKOVÁ, V. Effect of Spindle Unit Extrusion on Stability of Machining Process. *Manufacturing Technology*, 2015. ISSN: 1213-2489.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
$A\alpha$	[-]	označení hlavního hřbetu nástroje
$A'\alpha$	[-]	označení vedlejšího hřbetu nástroje
$A\gamma$	[-]	označení čela nástroje
CAE	[-]	CathodicArcEvaporation (obloukové napařování)
CVD	[-]	ChemicalVapourDeposition (chemické napařování)
FDM	[-]	FusedDeposition Modelling
HSS (RO)	[-]	High Speed Steel (rychlořezná ocel)
HSS Co5	[-]	rychlořezná ocel s přísadou kobaltu (5%)
HSS Co8	[-]	rychlořezná ocel s přísadou kobaltu (8%)
HSSE	[-]	litá rychlořezná ocel
HSSE_PM	[-]	rychlořezná ocel vyrobená práškovou metalurgií
MKP	[-]	metoda konečných prvků
NO	[-]	nástrojové oceli
PKD	[-]	polykrystalický diamant
PKNB	[-]	polykrystalický nitrid boru
PVD	[-]	PhysicalVapourDeposition (fyzikální napařování)
SK	[-]	slinuté karbidy
TZ	[-]	tepelné zpracování
A_{Di}	$[\text{mm}^2]$	jmenovitý průřez třísky
C_{Fc}	[-]	materiálová konstanta pro výpočet řezné síly
F_c	[N]	řezná síla
F_{ci}	[N]	řezná síla působící na i-tý zub frézy
F_{ci}	[N]	řezná síla působící na jeden břit
F_f	[N]	posuvová síla
F_{fi}	[N]	posuvová síla působící na jeden břit
F_p	[N]	pasivní síla
F_{pi}	[N]	pasivní síla působící na jeden břit
KT	[mm]	hloubka výmolu na čele
KVy	[mm]	radiální opotřebení špičky nástroje
L	[mm]	délka nástroje

R	[mm]	poloměr nástroje
VB	[mm]	Šířka fazetky na hřbetě
a_e	[mm]	radiální šířka záběru
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
b	[mm]	šířka třísky
d	[mm]	průměr nástroje
fz	[mm]	posuv na zub
h	[mm]	tloušťka třísky
kc	[MPa]	měrná řezná síla
l	[mm]	délka řezné části nástroje
l_0	[mm]	délka řezné části nástroje s výběhem brousícího kotouče
n	[1/min]	
r_e	[°]	poloměr zaoblení špičky nástroje
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_f	[mm/min]	posuvová rychlost
z	[-]	počet zubů nástroje
γ_0	[°]	ortogonální úhel čela
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
λ_s	[°]	úhel nastavení sklonu šroubovice
φ	[°]	úhel posuvového pohybu

Seznam příloh

- Příloha 1 Silikonová směs SILASTIC® T-4 [75]
- Příloha 2 Vosk A7-TGG/09 [76]
- Příloha 3 Technologie přesného lití pomocí vytavitelného modelu [78]
- Příloha 4 Použité slévárenské písky pro výrobu skořepinové formy [89]
- Příloha 5 Pomocné schéma pro výbrus prototypu nástroje
- Příloha 6 Schéma žíhacího cyklu v peci HV 60/15 oceli 422993 PM [46]
- Příloha 7 Schéma kalícího cyklu oceli 422993 PM [46]
- Příloha 8 Schéma popouštěcího cyklu oceli 422993 PM [46]
- Příloha 9 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli ČSN 41 2050 [84]
- Příloha 10 Třísky vzniklé při obrábění oceli ČSN 41 2050

Příloha 1: Silikonová směs SILASTIC® T-4

Silikonový kaučuk – základní hmota a tužidlo T-4/T-4

Vysoce pevný silikonový tepelně odolný kaučuk



Použití:

Silastic T-4 je vysoce pevný silikonový kaučuk k výrobě forem pro prototypy a malé série. Byla vyrobena zejména pro rychlou výrobu prototypů.

Silastic T-4 je dvousložkový silikonový kaučuk s možností volby tužidla a to mezi **T-4 S** (standard) nebo **T-4 O** (olejové). Po smíchání s tužidlem v poměru 10 : 1 se vytvrzuje při pokojové teplotě na průhledný (transparentní) kaučuk.

Tužidlo T-4 O vyvolává samomazný efekt, čímž vylepšuje separační vlastnosti materiálu.

Vlastnosti:

- vynikající samoseparační vlastnosti
- vytvrzení je možno urychlit teplem
- velmi nepatrné smrštění a dobrá dimenzní odolnost
- Velmi tvrdý, ale flexibilní a tuhý
- Vhodný zejména pro použití při vyšších teplotách
- Dvě silikonová tužidla:
 - T-4 S (standard) nebo
 - T-4 O (olejové)

Popis:

Silastic T-4 je dvousložkový silikonový kaučuk s možností volby tužidla a to mezi **T-4 S** (standard) nebo **T-4 O** (olejové). Po smíchání s tužidlem v poměru 10 : 1 se vytvrzuje při pokojové teplotě na průhledný (transparentní) kaučuk.

Tužidlo T-4 O vyvolává samomazný efekt, čímž vylepšuje separační vlastnosti materiálu.

Informace pro zpracování

		Směs SILASTIC S	Hmota	Tužidlo
Barva		průsvitná	-	-
Poměr míchání	Hmot. díly	-	100	10
Viskozita	mPas	cca 35 000	cca 70 000	cca 300
Čas zpracování	minut	90	-	-
Vytvrzení při pokoj. teplotě	Hod.	8	-	-

Vlastnosti

	Typ zkoušky	Jednotka	Hodnota
Tvrдость Shore	DIN 53505	Shore A	cca 40
Pevnost v tahu	EN ISO 527	MPa	6,7
Protažení	EN ISO 527	%	400
Odolnost proti přetržení	DIN ISO 34-1	kN/m	-
Hustota při 23°C	-	g/cm ³	-
Lineární smrštění	Interní pokyny	%	<0,1

Zpracování a použití:

Po smíchání s tužidlem v poměru 10:1 se vytvrzuje při pokojové teplotě na transparentní (průhledný) kaučuk. Tužidlo T-4 O vyvolává "samomazný efekt", čímž vylepšuje separační vlastnosti materiálu.

Hlavní znaky:

- rychlé vytvrzení za 6-8 hodin při pokojové teplotě
- nízká viskozita - snadné míchání a odplynění
- dobré separační vlastnosti

Povrch originálu musí být čistý bez zbytků staré hmoty. Při porézním povrchu používáme separátor voskový, anebo PTFE sprej. Mícháme v poměru 100:10 v čisté nádobě, důkladně až k úplnému spojení obou složek. Mícháme ručně nebo pomocí míchadla, plynule v menších dávkách a dbáme, aby teplota během míchání nestoupala nad 35°C. Doporučujeme směs podrobit vakuování pro odstranění vzduchu (1 - 2 min.). Během vakuování nabude směs až 5-ti násobku výchozího stavu, s čímž je třeba počítat při volbě velikosti mísící nádoby. Když vakuování neprovádíme, nanese vlasovým štětcem malou vrstvu (1-2 mm). Po jejím vytvrzení pak pokračujeme dále.

Odléváme co nejdříve, abychom snížili možnost pohlcení vzduchu. Vytvrzení do stavu flexibilní gumy nastane při teplotě 22-24°C za 6-8 hodin, pak můžeme rozebírat. Zkrácení vytvrzovací doby dosáhneme ohřevem, ale jen za cenu větší smrštitivosti.

UPOZORNĚNÍ:

Všechny elastomery vytvrzované tužidly, jsou při styku s určitými materiály náchylné k nedokonalému vytvrzení, to jest do 24 hod. Dojde jen k částečnému vytvrzení, anebo kontaktní plocha s druhým materiálem zůstává lepkavá. Materiály, které obsahují aminy, organické sloučeniny cínu, nebo látky složené ze sloučenin kyselin, působí mimořádně silně proti vytvrzování. Proto doporučujeme přezkoušet míchací nádoby, formy, vlastní modely a separátory, zda nebrání vytvrzování.

Použití:

Formy ze SILASTIC T-4 mají i při vysokých teplotách dlouhou životnost. Stálé používání nad 200°C však po delší době způsobuje snížení elasticity. Použití pro teploty nad 250°C se nedoporučuje.

Po úplném vytvrzení je SILASTIC T-4 velmi odolný chemikáliím. Dlouhodobý styk pryskyřicemi a dalšími agresivními hmotami může mít vliv na fyzikální vlastnosti, dělitelnost, eventuálně na přesnost rozměrů formy. Doporučuje se proto pravidelně rozměry forem přezkoušet.

Omezené ručení – prosím čtěte pozorně

Údaje obsažené v tomto návodu byly zhotoveny dle nejlepšího svědomí na základě výzkumů provedených v Dow Corning. Protože D.C. nemůže ovlivnit způsoby použití a podmínky, za kterých se výrobky používají, je nutno provést testy, aby se zjistilo, že výrobky v ohledu na výkon, účinek a spolehlivost jsou vhodné pro určité použití zákazníkem. Návrhy na použití výrobků nejsou chápány jako pokus o porušení patentových práv. Dow Corning dává záruku pouze na to, že výrobky odpovídají v době dodání aktuálnímu popisu výrobku. Nároky na záruku a jím odpovídající povinnosti výrobce Dow Corning v případě uznání záruky se omezí na náhradní dodávku nebo vrácení kupní ceny daného produktu. Dow Corning neručí za náhodné nebo následné škody.

Příloha 2: Vosk A7-TGG/09



Technical Data Sheet

A7-TGG/09 Jewellery Wax

Provisional

N.B. This TDS will be subject to review after 12 supplied batches.

Description

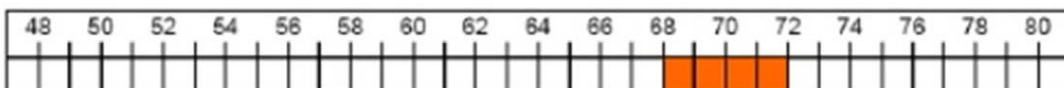
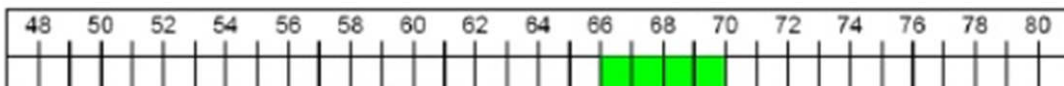
- A rigid jewellery wax
- Suitable for carving and hand forming
- Designed to be a very strong, tough wax
- Dimensionally very stable
- Non-sticky requiring very little release agent for removal from dies
- Resists cracking

Recommended Usage

- Maximum melting temperature of 100°C.
- The use of a suitable pattern wash, such as Trisol 60 Plus is suggested to aid in prime coat adhesion.

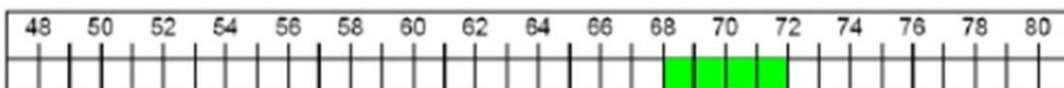
Typical Properties

Congeaing Point/°C



Drop Melt Point/°C

Recommended Injection Temperature/°C: Paste/Liquid



Mechanical Strength





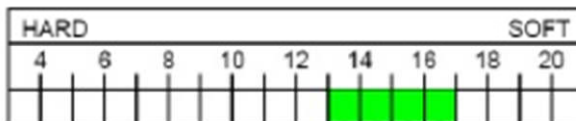
Technical Data Sheet

A7-TGG/09 Jewellery Wax

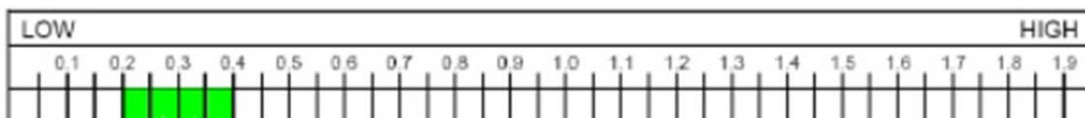
Provisional

N.B. This TDS will be subject to review after 12 supplied batches.

Penetration/10⁻¹ mm



Viscosity/Pa s @ 70°C

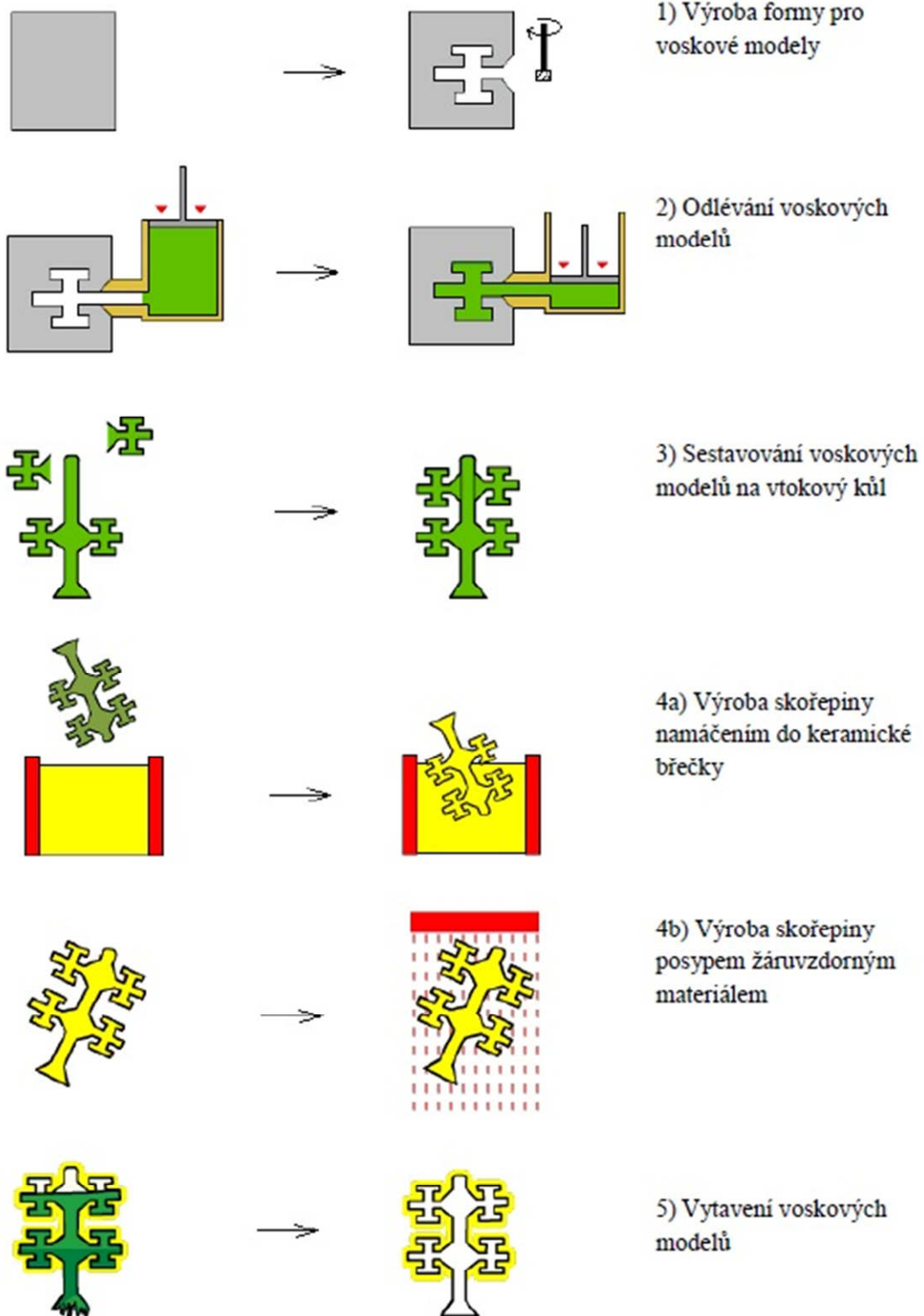


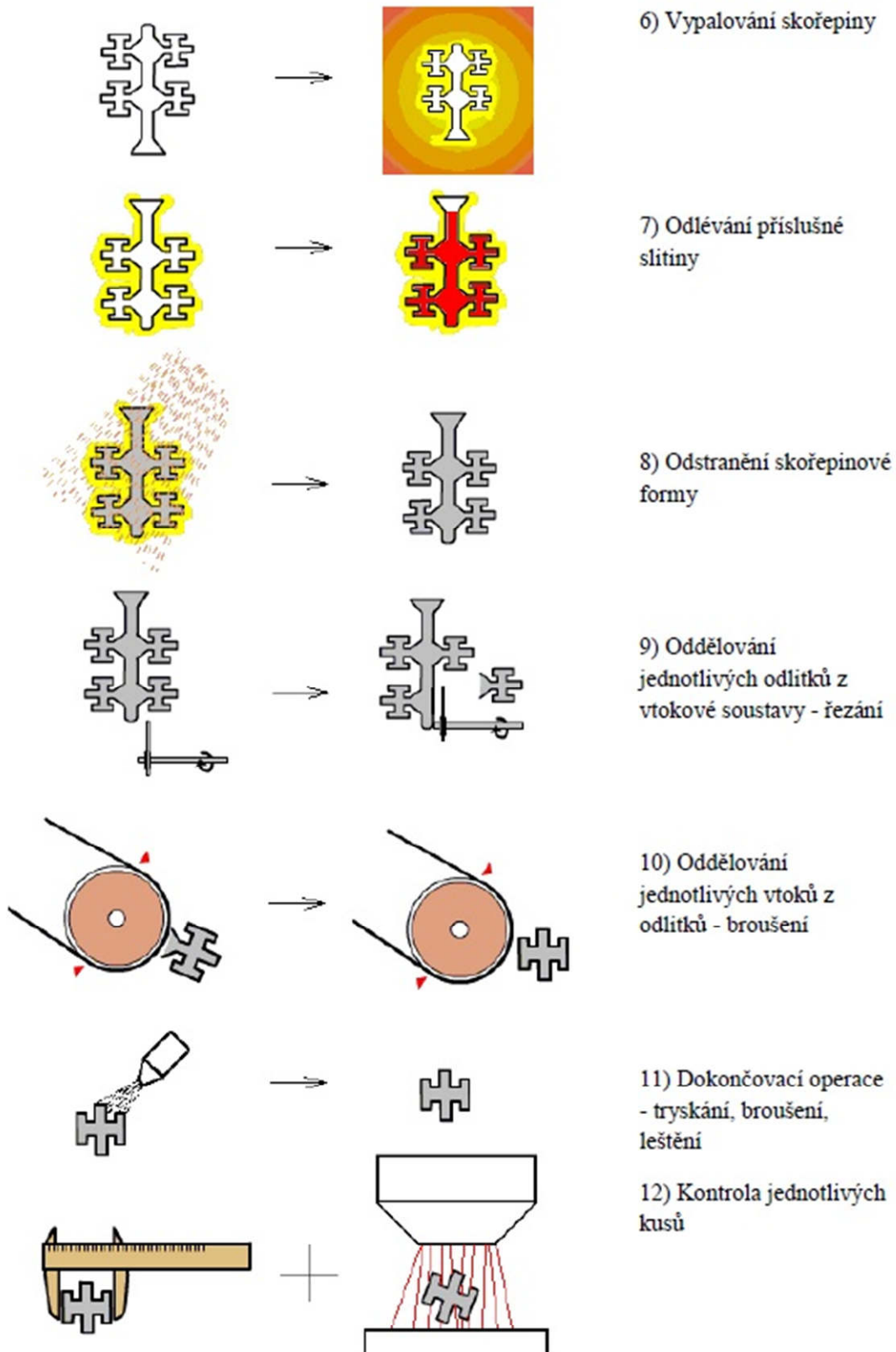
Fluidity



Type of Filler: NONE
Ash Content: 0.05% Max
Free Linear Contraction: 1.0 – 1.2% ESTIMATED

Příloha 3: Technologie přesného lití pomocí vytavitelného modelu





Příloha 4: Použité slévárenské písky pro výrobu skořepinové formy



Sklopísek Střeleč, a.s. | Hrdoňovice 80, 507 45 Újezd pod Troskami

Tel.: +420 493 505 111 | Fax: +420 493 505 328 | IČO: 44795688 | DIČ: CZ44795688
Registrováno v OR u Krajského soudu v Hr. Králové, 5. 12. 1991, odd. B, vl. 1093
Bankovní spojení: ČSOB a.s., č. ú. 17645673/0300
web: www.sklopisek.cz | e-mail: sklopisek@sklopisek.cz

TECHNICKÉ PÍSKY

Písky s extrémně vysokým obsahem SiO_2 jsou vynikající surovinou ve vodárenství k filtrování pitné vody a technologických vod, pro nejrůznější použití ve strojírenství, pro technologii přesného lití ve stavebnictví jako plnivo do průmyslových podlah, na tryskání betonových a ocelových konstrukcí, na zásyp umělých sportovních trávníků apod. Technický písek s malým obsahem Fe_2O_3 je vynikající surovinou v elektrotechnickém průmyslu jako hasivo do pojistek vysokého napětí, jako zásypová a izolační hmota v elektrických topných tělesech a v dalších oborech.

Písky se dodávají sušené, volně ložené a balené, pro nakládku na silniční nebo železniční dopravní prostředky.

ZRNITOSTNÍ DATA A VLASTNOSTI TÝKAJÍCÍ SE VELIKOSTI ČÁSTIC

	ST 01/06	ST 02/06	ST 03/08	ST 06/12	STF 06/12	ST 10/40	Metody
Velikost středního zrna (d50)	0,35	0,35	0,55	0,92	0,78	1,98	mm sítování
AFS	36	32	23	15	17	5	sítování
sypaná hmotnost	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	kg/l
> 4000 μm						0	% sítování
> 1250 μm			0	4	2		% sítování
> 1000 μm	0	0				99	% sítování
> 800 μm			5,5				% sítování
> 630 μm	7,5	0,5		93			% sítování
> 500 μm					96		% sítování
> 315 μm			93				% sítování
> 200 μm	82	98,5					% sítování
> 100 μm	10						% sítování
< 100 μm	0,5	1	1,5	3	2	1	% sítování

CHEMICKÉ ANALÝZY (RFA) %

	ST 01/06	ST 02/06	ST 03/08	ST 06/12	STF 06/12	ST 10/40
SiO_2	99,2	99,4	99,4	99,2	99,3	99,2
Fe_2O_3	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03

FYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKA

hustota (g/ml)	2,65	vlhkost (%)	0,2 max
tvrdost, Mohs	7	pH	7,2
ztráta žiháním (%)	0,1 - 0,3		

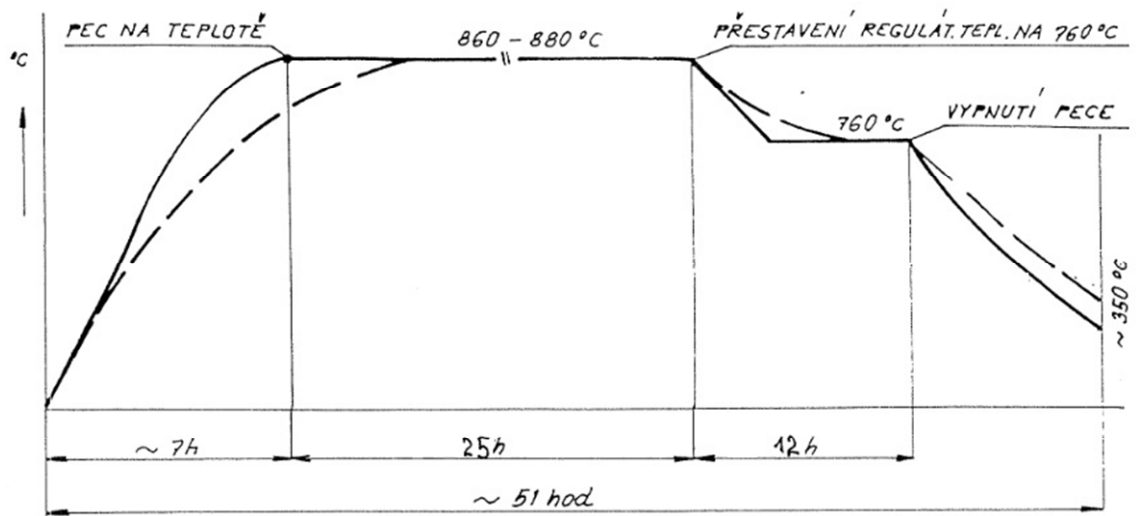
Křemenný písek ze Střelče je upravená přírodní surovina. Výše uvedené informace jsou založeny na středních hodnotách. Data by měla být považována pouze za indikativní. Hrubší a jemnější podíly jsou ve stopových množstvích možné. Uživatelé přísluší, aby nejprve otestovali a posoudili vhodnost použití pro svůj účel. O případných tolerancích výše uvedených hodnot výrobků je možné jednat.

Prodej a dodávání je vždy na základě sjednaných obchodních podmínek a podle příslušné podnikové normy nebo kvalitativní dohody.

Datum revize: 1.12.2013

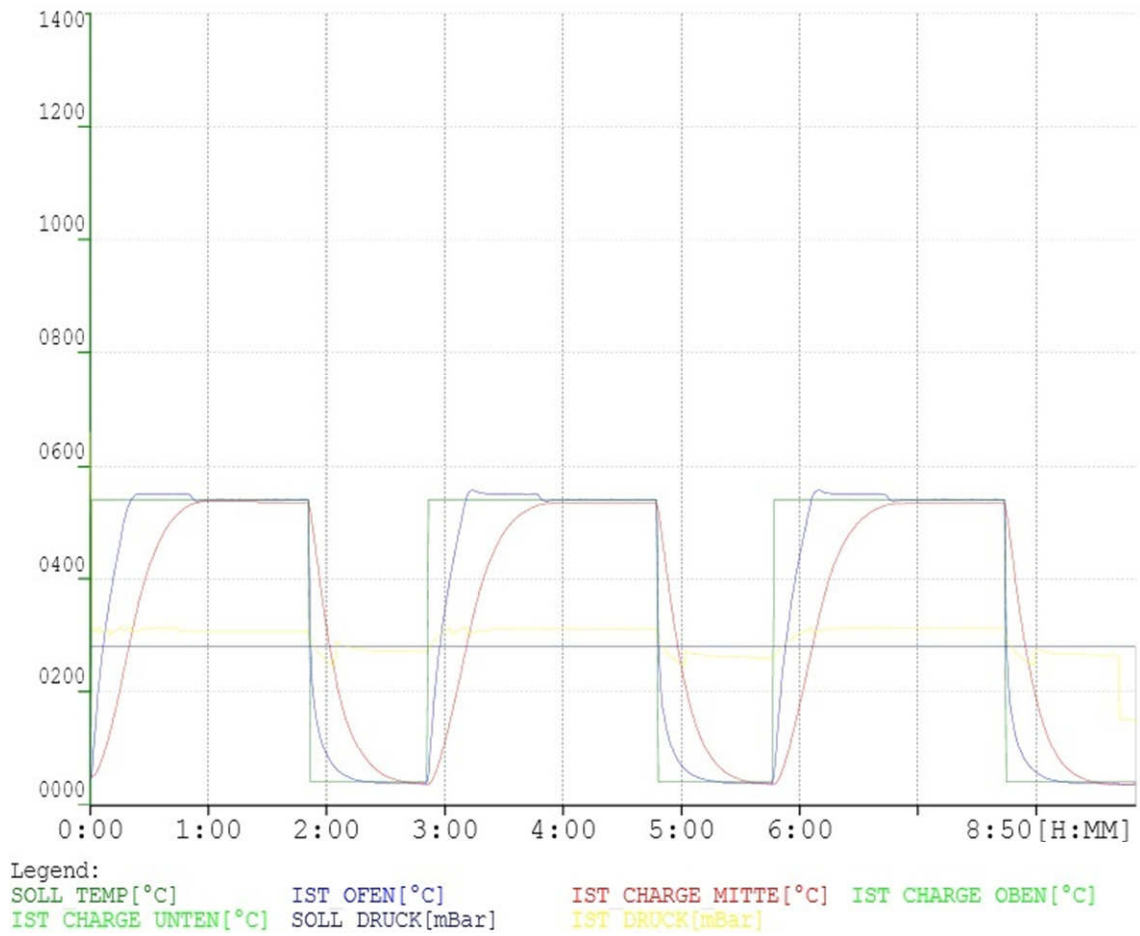
KATALOG PRODUKTŮ

Příloha 6: Schéma žhacího cyklu v peci HV 60/15 oceli 422993PM



Příloha 7: Schéma kalicího cyklu oceli 422993PM



Příloha 8: Schéma popouštěcího cyklu oceli 422993PM

Příloha 9: Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli ČSN 41 2050

Přehled vlastností oceli C45E (C45 R)										1.1191 (1.1201)								
Druh oceli	Nelegovaná ušlechtilá ocel k zušlechťování																	
TDP	ČSN EN 10083-2: 2007. Tato norma obsahuje též ocel C45, klasifikovanou jako jakostní ocel k zušlechťování. Ocelí C45 nelze nahradit ušlechtilé oceli C45E popř. C45R. C45 však lze nahradit ocelmi C45E resp. C45R.																	
Dřívější označení	C45E (C45R) podle ČSN EN 10083-1: 1991+A1: 1996; Ck 45 (Cm 45) podle DIN 17200; 12 050 podle ČSN.																	
Použití	Často používaná nelegovaná ocel pro výrobu méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechťeném nebo normalizačně žíhaném. Optimálních mechanických hodnot včetně houževnatosti se dosahuje v zakaleném a následně popuštěném stavu. U tvarově složitějších dílů se pro zamezení vzniku trhlin dává přednost kalení do oleje. Ocel je vhodná i k povrchovému kalení plamenem nebo indukci.																	
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S max. ¹⁾	Cr max.	Mo max.	Ni max.	Cr+Mo+Ni									
	0,42-0,50	0,40	0,50-0,80	0,030	0,035	0,40	0,10	0,40	max. 0,63									
Složení hotového výrobku ²⁾	0,40-0,52	0,43	0,46-0,84	0,035	0,040	0,45	0,13	0,45										
Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. ³⁾	Průměr mm	R _e min. MPa		R _m MPa		A min. %		Z min. %		KV min. J								
	d ≤ 16	490		700-850		14		35		-								
	16 < d ≤ 40	430		650-800		16		40		25								
Mechanické vlastnosti ve stavu normalizačně žíhaném ³⁾	d ≤ 16	340		min. 620		14		-		-								
	16 < d ≤ 100	305		580		16		-		-								
	100 < d ≤ 250	275		560		16		-		-								
Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost (+S)				Žíháno na měkko (+A)				Povrchově kaleno (tvrdost povrchu)									
	HB max. 255				HB max. 207				HRC min. 55									
Prokalitelnost ⁴⁾	Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušebního tělesa v mm																	
	Tvrdost v HRC																	
	+H	Mez	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	20	25	30
	max	62	61	61	60	57	51	44	37	34	33	32	31	30	-	-	-	-
	min	55	51	37	30	28	27	26	25	24	23	22	21	20	-	-	-	-
<p>Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 10 mm)</p>												<p>Křivky prokalitelnosti</p>						
Technologické vlastnosti																		
Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1150 až 850 °C																	
Tepelné zpracování	Normalizační žíhání °C	Žíhání na měkko °C	Isotermické žíhání °C	Teplota kalení °C	Kalící prostředí	Teplota popuštění °C	Zkouška kalením čela °C											
	840 až 880	650 až 700	800 až 950 660 -1 hod.	820 až 860	voda nebo olej	550 až 660	850 ± 5											
Obrobitelnost	Uvedené podmínky jsou doporučené s výjimkou zkoušky kalením čela (zkouška prokalitelnosti). Teplota kalení při spodní hranici se doporučuje pro kalení do vody a při horní hranici při kalení do oleje. Jako kalící prostředí lze použít i syntetické kapaliny-emuze.																	
Stříhatelnost	Obrobitelnost třískovým obráběním může být ve stavu po válcování ztížená vlivem zvýšené pevnosti. Pro obrábění je výhodnější stav žíhaný na měkko. Zlepšenou obrobitelnost vykazuje ocel C45R se zvýšeným obsahem S.																	
	Přichází v úvahu např. při dělení tyčí na vsázkové délky pro zápusťkové kování. Ocel C45 je stříhatelná za studena i ve stavu po válcování u průměru nad 80 mm.																	
<p>¹⁾ obsah síry u oceli C45R je 0,020 až 0,040 % s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku ± 0,005 %.</p> <p>²⁾ u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí, ale nikoliv obě současně.</p> <p>³⁾ uvedené hodnoty musí být dosažitelné po odpovídajícím tepelném zpracování (zušlechťení popř. normalizačním žíhání) též u oceli dodávané ve stavu po válcování nebo ve stavu měkce žíhaném. Prokazují se na referenčním vzorku odpovídajícího průměru. Zkušební tělesa pro stanovení mechanických hodnot musí být odebrána v souladu s předpisem normy TDP.</p> <p>R_e –mez kluzu, R_m – pevnost v tahu, A – tažnost (počáteční délka L₀ = 5,65√S₀), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso ISO s V-vrubem (průměr ze tří naměřených hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% minimální střední hodnoty).</p> <p>⁴⁾ pro ocel objednanou bez požadavků na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.</p>																		

Příloha 10: Třísky vzniklé při obrábění oceli ČSN 41 2050



Tříska vzniklá při 1. průjezdu nástrojem RMC s PVD povlakem (Al,Ti)N.



Tříska vzniklá při 50. (posledním) průjezdu nástrojem RMC s PVD povlakem (Al,Ti)N.



Tříska vzniklá při 1. průjezdu nástrojem ZPS s PVD povlakem (Al,Ti)N.



Tříska vzniklá při 50. (posledním) průjezdu nástrojem ZPS s PVD povlakem (Al,Ti)N.