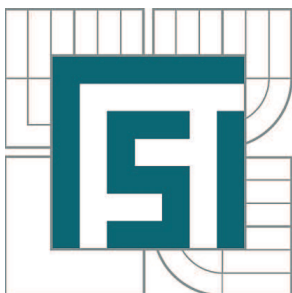


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

EFEKTIVNÍ FRÉZOVÁNÍ KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ OKTAGONÁLNÍ VBD

EFFECTIVE MILLING OF STAINLESS STEELS USING OCTAGONAL INSERTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR KOUŘIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Kouřil

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

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

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

Efektivní frézování korozivzdorných ocelí oktagonální VBD

v anglickém jazyce:

Effective milling of stainless steels using octagonal inserts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše zvolené problematiky. Korozivzdorných ocelí, vlivu geometrie a materiálu VBD na trvanlivost nástroje. Porovnání konkurenčních výrobků včetně doporučených řezných podmínek. Návrh, provedení a vyhodnocení testů pro navržené oktagonální VBD. Následné doporučení vhodného řešení včetně řezných podmínek.

Cíle diplomové práce:

- rešerše související problematiky
- vytipování konkurenčních produktů
- volba vhodného řešení a provedení testů oktagonálních VBD
- vyhodnocení získaných dat
- zhodnocení a doporučení do budoucna

Seznam odborné literatury:

1. HUMÁR, Anton. Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění. Brno: CCB, 1995, 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
2. ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. Brno: CERM, 2003, 192 s. ISBN 80-214-2336-6.
3. DAVIM, J. Paulo. Surface Integrity in Machining. 1. vyd. London: Springer, 2010, 215 s. ISBN 978-1-84882-873-5.
4. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-2542250-2.
5. Springer handbook of mechanical engineering. 1st ed. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-354-0491-316.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 31.10.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na problematiku efektivního frézování korozivzdorných ocelí. V teoretické části práce jsou charakterizovány jednotlivé skupiny těchto ocelí a je analyzována jejich obrobiteľnosť. V praktické části byly čelně frézovány korozivzdorné oceli ČSN 17 240.4 a ČSN 17349.4. Je zde vyhodnocena trvanlivost ostří, drsnost povrchu, tvar třísky, zatížení řeznými silami a efektivnost zkoušených nástrojů.

Klíčová slova

korozivzdorné oceli, frézování, trvanlivost ostří, drsnost povrchu, řezná síla, efektivita

ABSTRACT

Thesis aims on efficient milling of stainless steels. Groups of these steels are characterized and their machinability is analyzed in theoretical part of this thesis. In the practical part of thesis were face milled stainless steels ČSN 17 240.4 a ČSN 17349.4. There are evaluated edge durability, roughness of surface, loading of total cutting force and effectiveness of test tools.

Key words

stainless steels, milling, edge durability, roughness of surface, cutting force, effectiveness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUŘIL, Petr. *Efektivní frézování korozivzdorných ocelí oktagonální VBD*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 70 s. 5 příloh. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Efektivní frézování korozivzdorných ocelí oktagonální VBD** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Petr Kouřil

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval především odbornému konzultantovi panu Ing. Martinu Binderovi z firmy Pramet Tools s.r.o., vedoucímu práce panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph. D. a Ing. Miroslavu Kouřilovi za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěli k vypracování této diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
ÚVOD.....	9
1 Charakteristika korozivzdorných ocelí	10
1.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí dle struktury	11
1.1.1 Martenzitické (kalitné) oceli	12
1.1.2 Feritické a poloferitické oceli	13
1.1.3 Austenitické oceli	13
1.1.4 Dvoufázové oceli	15
2 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí.....	16
2.1 Metody určení obrobitelnosti	16
2.2 Obrobitelnost jednotlivých skupin korozivzdorných ocelí	19
2.3 Zlepšení obrobitelnosti.....	20
2.4 Opotřebení rezného nástroje	21
2.5 Třísky, její tvary a hodnocení.....	22
2.6 Hodnocení efektivnosti frézovacích nástrojů.....	23
2.7 Doporučení při frézování	24
3 Popis použitého zařízení, stroj – nástroj – obrobek	25
3.1 Obráběcí stroje	25
3.1.1 Kovosvit MAS, MCV 1270 Power	25
3.1.2 OSO, FV25CNC A	26
3.2 Nástroje pro obrábění korozivzdorné oceli	27
3.2.1 Popis a charakteristika použitých nástrojů.....	27
3.2.2 Pramet Tools	29
3.2.3 Mitsubishi Materials	32
3.2.4 Iscar.....	34
3.2.5 Volba rezných podmínek	36
3.3 Materiál obrobku.....	37
4 Provedení a výsledky experimentů	39
4.1 Měření trvanlivosti	41
4.1.1 Trvanlivost nástrojů Pramet Tools při obrábění oceli ČSN 17 349.4.....	42
4.1.2 Trvanlivost nástrojů při obrábění oceli ČSN 17 240.4	46
4.2 Drsnost povrchu obrobené plochy	51
4.3 Utváření třísky.....	55

4.4	Silové zatížení	56
4.4.1	Zatížení vřetene.....	56
4.4.2	Řezné síly.....	56
4.5	Efektivnost	60
4.6	Vyhodnocení provedených experimentů.....	63
4.7	Doporučení	65
ZÁVĚR		66
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		67
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		69
SEZNAM PŘÍLOH.....		70

ÚVOD

Diplomová práce je zaměřena na hodnocení efektivnosti obrábění korozivzdorných ocelí. Práce je také zaměřena na funkční zkoušky, při kterých byla zjišťována drsnost povrchu, utváření třísky a silové zatížení vřetene.

Problematika frézování korozivzdorných ocelí se stává pro výrobce obráběcích nástrojů stále zajímavější, jelikož dle organizace Euro Inox je předpokládán 7% meziroční růst produkce těchto materiálů. Dle firmy Pramet Tools je aktuálně na obrábění korozivzdorných ocelí poptáváno 20–30 % nástrojů z jejich celkové produkce. V současné době nejsou jejich nástroje svojí geometrií specializovány, jedná se především o nástroje vhodné pro obrábění materiálů skupin P, M a K (ocelí, korozivzdorných ocelí a litin).

Z tohoto hlediska je snaha rozšířit sortiment o nejčastěji používané tvary vyměnitelných břitových destiček určených speciálně pro obrábění korozivzdorných ocelí. Současně zde probíhá i vývoj nástrojů pro obrábění materiálů skupiny S. Vedle korozivzdorných ocelí jsou stále častěji používané těžkoobrobitelné materiály.

Dnes má firma Pramet Tools pro frézování korozivzdorných ocelí v nabídce frézy s úhlem nastavení 45°, osazené vyměnitelnými břitovými destičkami tvaru ODMT. Výkon těchto nástrojů již přestává být konkurenceschopný. Z nově vyvinutých nástrojů určených pro frézování korozivzdorných ocelí využívající nový materiál, jsou v nabídce jen frézy, které jsou osazovány čtvercovými destičkami s úhlem hřbetu 20° (označení SE...). V nejbližší době by se nabídka frézovacích nástrojů měla rozšířit o frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami kruhovými a v této práci hodnocenými oktagonálními destičkami OEHT 06. Dále se nabídka rozšíří i o další velikosti uvedených vyměnitelných břitových destiček a jím odpovídajících fréz.

Cílem této diplomové práce bylo hodnocení efektivnosti frézování při použití oktagonálních vyměnitelných břitových destiček. Toto hodnocení společně s dalšími funkčními zkouškami sloužilo pro výběr nejvhodnější varianty z navržených prototypů. Nejvhodnější varianty byly porovnány s nástroji vytipovaných konkurenčních firem pro zjištění jejich konkurenceschopnosti. Jednalo se především o nástroje firmy Mitsubishi Materials, jejíž nástroje pro obrábění korozivzdorných ocelí patří k absolutní špičce.

1 CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ

Korozivzdorná ocel, jak je z názvu patrné je ocel se zvýšenou odolností proti korozi. Například dle zemí zařazených do organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD) vzrostla průmyslová výroba za posledních 40 let zhruba čtyřikrát, přitom výroba korozivzdorných ocelí v tomto období vzrostla osminásobně. V dalších letech se předpokládá další růst výroby korozivzdorných ocelí, tento růst se odhaduje řádově na 5 % až 7 % ročně.[1]

Korozivzdorné oceli a jsou materiály obsahující vysoký podíl chromu v kombinaci s niklem nebo manganem. Dále tyto oceli a slitiny obsahují i další prvky jako je Nb, Ti, Ta, C, Si a Mo. Právě vysoký podíl chromu 12 až 30% (Cr) zajišťuje pasivitu ocelí proti korozi. Jelikož pasivitu zajišťuje chrom obsažený v tuhém roztoku vyšší než 11,5%, stává se uhlík (C) nežádoucím, jelikož chrom má vysokou afinitu k uhlíku a tvoří s ním karbidy. Precipitáty karbidů chromu ($M_{23}C_6$) vyskytující se na hranici zrn mohou být příčinou mezikrystalické koroze. V korozivzdorných ocelích proto bývá zpravidla obsah uhlíku do 0,08%. Výjimku tvoří martenzitické oceli, které mají obsah uhlíku vyšší. V ostatních případech, pro snížení množství karbidů chromu, musíme snížit obsah uhlíku, nebo přidat prvek s vyšší afinitou k uhlíku než má chrom. Mezi takové materiály patří právě zmiňovaný niob (Nb), tantal (Ta) či titan (Ti). Tyto prvky přidáváme v odpovídajícím stechiometrickém poměru dle složení karbidů NbC, TaC, či TiC, které hodláme vytvořit.

Korozivzdorné oceli lze dělit dle chemického složení, či struktury materiálu. Rozdělení dle chemického složení je znázorněno v tabulce 1. Dále budou v této práci rozděleny a popisovány korozivzdorné oceli z hlediska struktury. Zde dělíme korozivzdorné materiály na feritické, austenitické, martenzitické, dvoufázové (duplexní).

Tab. 1 Rozdělení korozivzdorných ocelí dle struktury [1]

Struktura	Hlavní legující prvky
Feritická	Cr
martenzitická	Cr, C nebo Ni
austenitická	Cr, Ni, Mo
austeniticko-feritická (duplexní)	Cr, Ni, Mo (vyšší obsah Cr a nižší Ni než u austenitických ocelí)

Jednotlivé druhy ocelí lze označovat zkratkami či materiálovými čísly. V praxi se dává přednost materiálovým číslům a to především díky jejich krátkosti. Přehled a význam materiálových čísel korozivzdorných ocelí je uveden v tabulce 2.

Tab. 2 význam materiálových čísel korozivzdorných ocelí. [1]

materiálové číslo	Složení	ostatní legury
1.40	Cr-oceli < 2.5% Ni	bez Mo, Nb, nebo Ti
1.41		s Mo, bez Nb, nebo Ti
1.43	Cr-oceli ≥ 2.5% Ni	bez Mo, Nb, nebo Ti
1.44		s Mo, bez Nb, nebo Ti
1.45	oceli Cr, CrNi, nebo CrNiMo se zvláštními přísadami (Cu, Nb, Ti,...)	
1.46		

1.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí dle struktury

Chceme-li určit strukturu materiálu, musíme sledovat vztah jednotlivých přidaných prvků k soustavě Fe-C, které můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

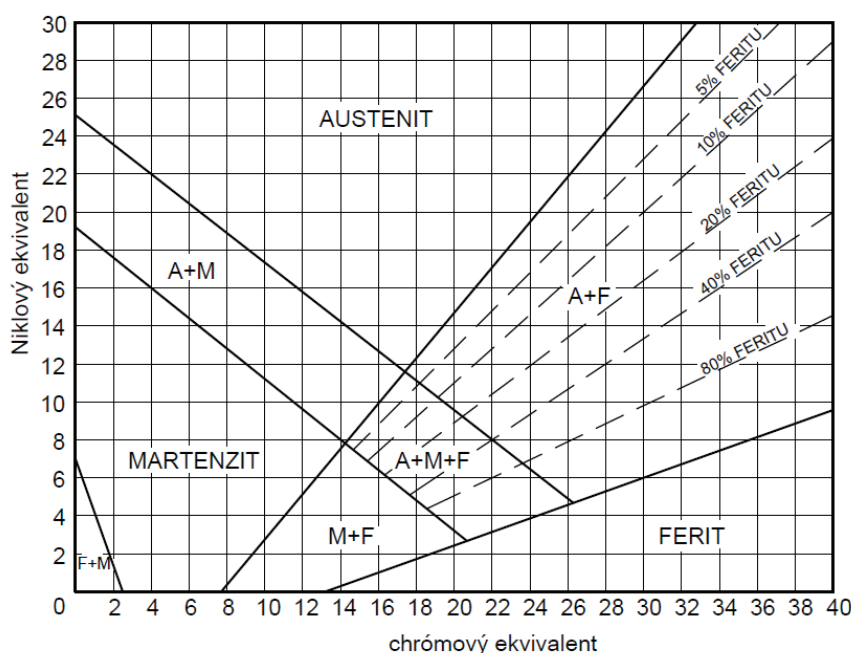
- Prvky rozšiřující oblast výskytu feritu. Hovoříme tedy o feritotvorných prvcích, jejichž představitelem je chrom a dále mezi ně patří molybden, křemík, niob, titan, hliník, vanad a další.
- Prvky rozšiřující oblast výskytu austenitu. Zde hovoříme o prvcích austenitotvorných. Jejich hlavním zástupcem je nikl a dále mezi ně patří uhlík, dusík, mangan a měď.

Pokud známe obsah jednotlivých legur v korozivzdorné oceli, můžeme následně při použití Schäffler-Delongova diagramu zjistit její strukturu. Ke zjištění této struktury provedeme výpočet chromového a niklového ekvivalentu. Chromový ekvivalent (Cr_{ek}) je určen obsahem prvků zvětšující oblast výskytu feritu a vypočteme ho dle rovnice 1. Analogicky vypočteme ekvivalent niklový (Ni_{ek}), který určíme pomocí množství jednotlivých prvků zvětšující oblast výskytu austenitu, dle rovnice 2.

$$Cr_{ek} = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \quad (1)$$

$$Ni_{ek} = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad (2)$$

Po zjištění niklového a chromového ekvivalentu lze určit strukturu této korozivzdorné oceli dle Schäfflerova diagramu viz obr. 1. K určení lze využít také Schäffler-Delongův nebo Delongův diagram, jejichž ekvivalenty zahrnují či pomíjí jiné prvky v dané oceli přítomné než Schäfflerův diagram. [2]



Obr. 1 Schäfflerův diagram. [2]

1.1.1 Martenzitické (kalitelné) oceli

Korozivzdorné oceli s obsahem 12-18 % Cr a obsahem uhlíku vyšším než 0,1% jsou při vyšších teplotách plně austenitické. Při ochlazení oceli nadkritickou rychlostí z oblasti austenitu dostáváme strukturu martenzitickou. Nadkritická rychlost ochlazování v případě těchto ocelí může nastat dle druhu korozivzdorné oceli například už při ochlazování vzduchem. Oblast austenitu v závislosti na chemickém složení leží v oblasti teplot mezi 950 °C a 1050 °C. Martenzitické korozivzdorné oceli mají dobré mechanické vlastnosti a jsou vhodné pro použití v mírně agresivním prostředí. Jejich tvrdost je závislá na obsahu uhlíku, tedy čím vyšší obsah uhlíku, tím dostáváme ocel o vyšší tvrdosti. Přibližné hodnoty tvrdosti jsou zaznamenány v tabulce 3. Pro zlepšení korozivzdornosti se přidává Molybden. Nejpoužívanější je korozivzdorná ocel s 11,5 % až 13,5 % Cr a do 0,15 % C. Například pro výrobu nožů se používá ocel s obsahem uhlíku 0,2 % až 0,4 % a do 14,5 % Cr. Tyto oceli lze dělit [1, 2]:

- Martenzitické oceli a vytvrditelné chromové a chromniklové oceli: Nejčastěji obsahují do 15 % Cr a do 0,25 % C. Používají se pro zdravotní techniku, vodní stroje a potravinářství.
- Martenzitické oceli bez niklu: Po zakalení mohou mít pevnost v tahu až 1600 MPa a tvrdost až 58 HRC. Při následném popouštění lze získat nižší tvrdost s dobrou odolností proti korozi nebo lepší plastické vlastnosti a houževnatost.
- Martenzitické oceli s niklem: Zachovává se jejich základní vlastnost, kalitelnost. Zároveň nedochází k nepříznivým projevům zvýšeného obsahu uhlíku. Nedochází tedy k vylučování karbidů a k růstu tvrdosti. Tento materiál má tedy dobré plastické vlastnosti, vysokou mez únavy a vysokou prokalitelnost. Tato struktura zaručuje při mezi kluzu nad 600 MPa vysokou houževnatost. Je vhodná pro stavbu vodních strojů a při obsahu do 6 % Mo také pro zařízení pracující v mořské vodě.
- Vytvrditelné oceli: Oceli legované hliníkem nebo mědí. Po vytvrzení ocelí legovaných mědí za teplot 400 °C až 500 °C se dosahuje pevnosti v tahu až 1500 MPa. Tyto oceli jsou využívány pro pancíře, v leteckém průmyslu a na nástroje při lisování gum a plastů. U ocelí legovaných hliníkem dostáváme po vytvrzení pevnost v kluzu až 1250 MPa s pevností v tahu 1400 MPa při tažnosti 10 %. [2]

Tab. 3 Závislost obsahu uhlíku na tvrdost [1]

Obsah uhlíku [hmotnostní %]	Tvrdost [HRC]
0,1	40
0,15	46
0,20	50
0,25	53
0,4	56
0,7	58
1	60

1.1.2 Feritické a poloferitické oceli

Obsahují 11 % až 30 % Cr a do 0,08 % C. Rozpustnost uhlíku ve feritu je nízká. Proto při vyšších koncentracích uhlíku je uhlík vylučován ve formě karbidů, které způsobují křehnutí oceli. Tyto oceli s vyšším obsahem uhlíku jsou tedy při pokojové teplotě křehké.[2]

Při ohřevu oceli s nízkým obsahem chromu dochází při teplotách mezi 350 až 550 °C ke křehnutí, které vrcholí při 475 °C. Toto křehnutí je potlačeno při horní hranici obsahu Cr což je 30 % Cr a velmi nízkém obsahu uhlíku. Tyto oceli s vysokým obsahem Cr a obsahem uhlíku a dusíku mají za pokojové teploty dobrou houževnatost. [2]

Zvýšení pevnosti lze dosáhnout pouze tvářením, čímž se také zjemní zrna. Tepelným zpracováním lze snížit zpevnění, vyrovnat obsah chromu na hranicích zrn a snížit náchylnost k mezikrystalické korozi. Tepelné zpracování probíhá za teplot 750 °C až 900 °C, nad 900 °C dochází ke hrubnutí zrna. [2]

Z hlediska korozivzdornosti lze feritické oceli dělit na dvě skupiny a to na oceli s 11 % až 13 % Cr a druhou skupinou jsou oceli s přibližně 17 % Cr. Zástupci první skupiny jsou například oceli 1.4003, či 1.4512, tyto oceli mají v důsledku nižšího obsahu chromu nižší odolnost vůči korozi. Všeobecně lze říci, že jsou korozivzdorné jen v atmosférických podmínkách, nebo při kontaktu s vodnatými médii. Druhá skupina s vyšším obsahem chromu se vyznačuje vyšší odolností vůči korozi. Často jsou tyto oceli odolné proti mezikrystalové korozi. Korozivzdornost lze ještě zvýšit například dolegováním zhruba 1 % molybdenu. Další možností zlepšení korozivzdornosti je přidání prvků, které na sebe váží uhlík, v praxi je používán titan či niob. Takovéto oceli se vyznačují stálostí i po svařování bez následného tepelného zpracování. [2]

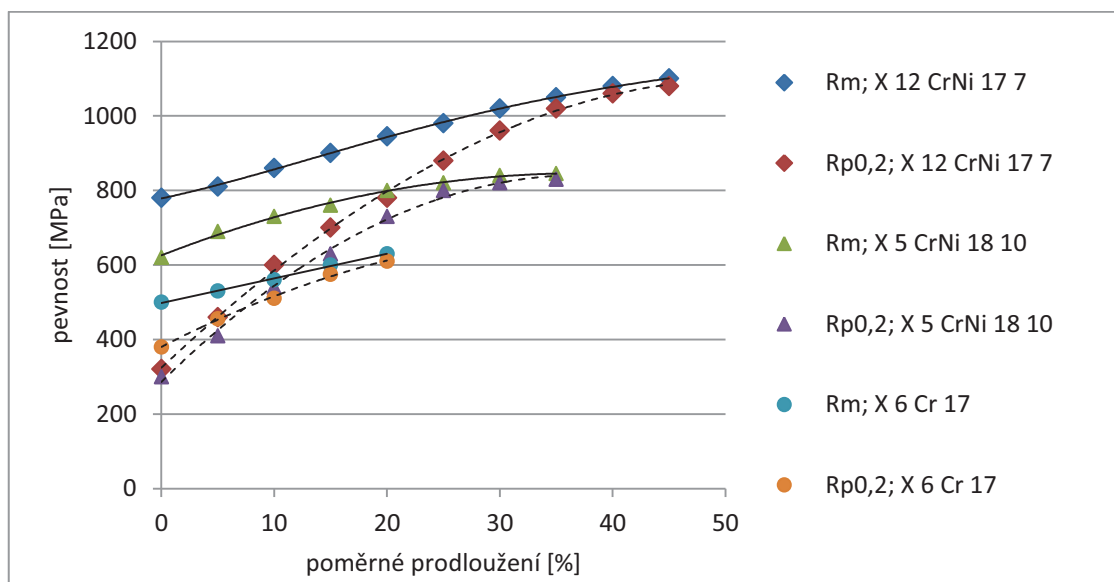
Tyto oceli jsou používány v domácích spotřebičích, v potravinářství, v zařízeních pro výměnu tepla a oxidačním prostředí různých kyselin, dusičnanů a jiných agresivních prostředí. Feritické korozivzdorné oceli jsou také využívány v automobilovém průmyslu například při výrobě výfukového potrubí. [1, 2]

1.1.3 Austenitické oceli

Austenitické oceli se vyznačují příznivou kombinací obrobiteľnosti, mechanických vlastností a korozivzdornosti. To z nich činí vhodné pro mnoho účelů použití. Mezi oceli s těmito vlastnostmi patří především chromniklové oceli s 8 % niklu. Nejdůležitější vlastností je samozřejmě korozivzdornost. Korozivzdornost austenitických ocelí je velmi vysoká a se zvyšujícím se obsahem legur, hlavně tedy obsahem chromu a molybdenu se zvyšuje. Stejně jako u feritických ocelí tak i u austenitických ocelí je pro dosažení dobrých technologických vlastností nezbytná jemnozrná struktura. Austenitické oceli jsou běžně používány v žíhaném stavu, proto jako konečnou tepelnou úprava bývá rozpouštěcí žíhání. Rozpouštěcí žíhání je u těchto ocelí prováděno v teplotním pásmu mezi 1000 °C a 1150 °C s následným ochlazením ve vodě nebo na vzduchu. [1, 2]

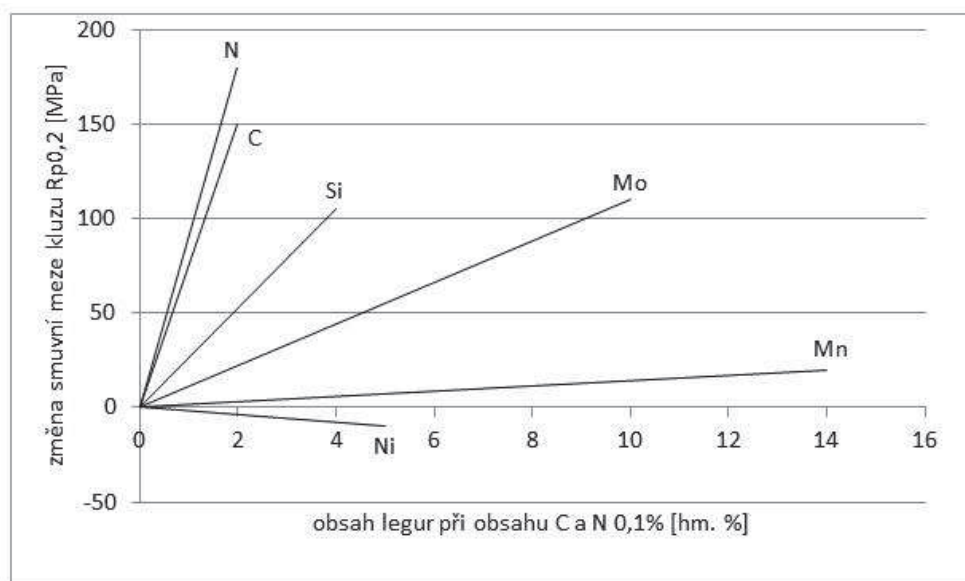
Tyto oceli jsou velice měkké a houževnaté, čemuž odpovídá nízká pevnost v kluzu přibližně 200 MPa, pevnost v tahu maximálně 650 MPa a vysoká tažnost až 50 %. Při srovnání zjistíme, že poměrné prodloužení při přetržení jsou téměř dvojnásobné oproti feritickým ocelím. Všeobecně lze tedy austenitické oceli označit jako dobře tvářitelné za studena. Dále lze předpokládat vhodnost pro provádění hlubokého tažení, přetahování, či ohýbání. Pokud je požadována vyšší pevnost je možno využít sklonu k deformačnímu

zpevnňování. Pro zpevnňování se využívá tváření za studena, kdy stupeň zpevnňování je přímo závislý na stupni přetvoření. Při tváření za studena může docházet k tvorbě deformačního martenzitu. Závislost meze pevnosti a smluvní meze kluzu v závislosti na poměrném prodloužení znázorňuje obr. 2, na kterém lze také porovnat maximální poměrné prodloužení při přetržení mezi feritickou a austenitickou ocelí. [1, 2]



Obr. 2 Deformační zpevnňování korozivzdorných ocelí. [1]

Další možností jak dosáhnout vyšší pevnosti je zpevnňování tuhého roztoku, tedy vlivem přísadových prvků. Vliv přísadových prvků na smluvní mez kluzu austenitických korozivzdorných ocelí znázorňuje obr. 3. Je zřejmé, že nejvyšší vliv na růst meze pevnosti tedy i meze kluzu má dusík a uhlík. V rámci zachování korozivzdornosti je uhlík jako legura nevhodná. Dolegování dusíkem je vhodnější, jelikož kromě zvýšení pevnostní charakteristiky se zlepšuje i odolnost vůči korozi. Při využití vhodných legur lze u austenitických korozivzdorných ocelí dosáhnout smluvní meze kluzu až $R_{p0,2} = 400$ MPa. [1]



Obr. 3 vliv legur na smluvní mez kluzu austenitických korozivzdorných ocelí [1]

Vlastnosti jednotlivých ocelí lze samozřejmě ovlivnit i jinými legurami. Vzhledem k obrobitelnosti jsou směrodatné legury: Cu, Si, Se, P, Pb. Tyto legury zlepšují obrobitelnost, bohužel zároveň při přidání těchto prvků dochází k snižování korozivzdornosti, jedinou výjimkou je měď, která zvyšuje korozní odolnost v prostředích kyseliny sírové. Pokud se zaměříme na prvky obrobitelnost zhoršující, narazíme kromě chromu, který způsobuje vysoký součinitel tření mezi nástrojem a obrobkem, také například na hliník. Hliník zhoršuje obrobitelnost díky svému sklonu k precipitačnímu vytvrzování. V neposlední řadě má na obrobitelnost vliv i titan s niobem, které se váží na uhlík a dusík, se kterými tvoří karbidy a nitridy. [2]

1.1.4 Dvoufázové oceli

Dvoufázové, neboli také duplexní korozivzdorné oceli, jak je zřejmé z názvu obsahují dvě rozdílné struktury. Zpravidla strukturu tvoří austenit a ferit, popřípadě martenzit. Nejvyužívanější dvoufázové oceli jsou austeniticko-feritické, ale vyskytují se i oceli martenziticko-feritické, či martenziticko-austenitické.

Výroba austeniticko-feritické korozivzdorné oceli spočívá v dolegování feritické korozivzdorné oceli na bázi chromu niklem. Při zvyšování podílu niklu dochází ke změně krystalické mřížky z kubické prostorově středěné (feritická korozivzdorná ocel) na kubickou plošně středěnou (austenitická korozivzdorná ocel). Podíl vzniklého feritu dosahuje 25 – 80 %, avšak za normální teploty okolí je vzájemný poměr mezi množstvím feritu a austenitu 50 – 50 %. Obsah legujících prvků bývá 18 – 28 % Cr a 4 – 7 % Ni. Každá z přítomných fází má rozdílné vlastnosti, austenit zlepšuje odolnost proti korozi a ferit zvyšuje pevnost. Tyto oceli se vyznačují vysokou mezí pevnosti v tahu, mají vyšší mez kluzu než austenitické oceli a po tepelném zpracování dosahují meze kluzu 420 MPa až 530 MPa, další předností je vysoká odolnost proti korozi a vysoká houževnatost s tažností okolo 40 %². Zpevnění dvoufázových ocelí dochází i pomocí deformačního zpevnění za studena, porovnání průběhu zpevňování dvoufázové oceli DIN 1.4301(ČSN 17 240) s ocelí feritickou a austenitickou znázorňuje obr. 2. Dvoufázové korozivzdorné oceli mají široké spektrum použití především potravinářský, papírenský, a také chemický průmyslu díky dobré odolnosti vůči působení kyselin a chlóru. Dále jsou využívány při výrobě různých zařízení na moři a pobřeží, především pro těžbu ropy a plynu. [1, 2, 3]

Martenziticko-feritické korozivzdorné oceli se vyznačují nízkým obsahem uhlíku do 0,04 %, pro zvýšení pevnosti je přidáván mangan a dále pro stabilizování oceli, zjemnění zrna, je přidáván titan, či niob. Výsledný materiál obsahuje přibližně 20 % feritu, je dobře tváritelný a je z něj možno vyrábět i trubky válcované za tepla. Trubky vyrobené z tohoto materiálu se využívají například pro vodné roztoky obsahující CO₂, jako jsou kyselé vody při těžbě zemního plynu obsahující chloridy. [4]

Martenziticko-austenitické korozivzdorné oceli obsahují přibližně 0,06 % C, 13 – 16 % Cr, 4 – 6 % Ni a do 2 % Mo. Struktura je tvořena martenzitem a zhruba 25 % austenitu, při vyšším množství Cr a Mo se vyskytuje i delta ferit. Vyznačují se vysokou pevností, jsou vysoce odolné proti křehkému lomu a odolností vůči kavitaci. Díky dobré odolnosti vůči kavitaci a svařitelnosti, využívají se tyto oceli ke konstrukci oběžných kol vodních turbín, v parních elektrárnách, na armatury a čerpadla v chemickém průmyslu. [4]

2 OBROBITELNOST KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ

Obrobitelnost je velice rozšířený výraz, který lze interpretovat různými způsoby. Například z knihy A. Humára, který ve své knize „Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění“ definuje obrobitelnost materiálu takto: „Z hlediska technologie obrábění je obrobitelnost jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu a v obecném smyslu ji lze definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Je hlavním činitelem, který ovlivňuje volbu řezných podmínek pro funkci nástroje při všech metodách obrábění.“. Obrobitelnost lze také chápat jako souhrn parametrů, který může být definován jako vlastnost vyjadřující jak je finančně, či časově náročné obrobit materiál do určitého tvaru v uvedených tolerancích a při dané jakosti povrchu.

Při určování obrobitelnosti musíme brát v potaz mnoho faktorů, při jejichž změně dochází ke změně výsledné obrobitelnosti. Nejdůležitější faktory ovlivňující obrobitelnost z hlediska obráběného materiálu jsou [1, 5]:

- chemické složení,
- způsob výroby,
- tepelné zpracování,
- mikrostruktura,
- fyzikální a mechanické vlastnosti.

Dále z hlediska procesu obrábění:

- metoda obrábění,
- pracovní prostředí,
- druh a vlastnosti materiálu nástroje,
- vlastnosti materiálu nástroje,
- geometrie nástroje.

2.1 Metody určení obrobitelnosti

Obrobitelnost je obtížné definovat jako absolutní hodnotu nějaké veličiny, proto lze obrobitelnost materiálu posuzovat z různých hledisek. Určování obrobitelnosti pomocí absolutní veličiny je možné pouze u porovnávání několika velice si podobných materiálů. Měření musí probíhat za pokud možno stejných podmínek, jediný rozdílný parametr tedy je jen ten měřený. Dané výsledky jsou velice závislé na podmínkách obrábění. Pro takové měření jsou vhodné:

- objem odebraného materiálu V [cm^3],
- velikost obrobené plochy A [cm^2] za dodržení určité jakosti povrchu,
- řezná dráha L [m].

Vše vztaženo k jednotce času např. minutu, nebo za danou trvanlivost ostří. [06]

Jak již bylo naznačeno, ne vždy je vhodná a o procesu vypovídající absolutní hodnota jedné veličiny, proto se pro obrobitelnost v praxi využívá hodnot relativních, tedy hodnota

měřená je porovnávána s hodnotou odpovídající pro jiný materiál, takzvaným etalon. Pro vyhodnocení obrobiteľnosti existuje mnoho kritérií, ale ta nejdůležitější vychází z intenzity opotřebení břitů. Z tohoto hlediska je velice důležitou charakteristikou obrobiteľnosti

$$v_c = \frac{C_v}{T_{opt}^m \cdot a_p^{x_{vc}} \cdot f^{y_{vc}}} \quad (3)$$

materiálu Taylorův vztah, který lze dále využít pro optimalizaci řezných podmínek.[2, 7]

kde:

v_c	...	řezná rychlost [m/min],
C_v	...	konstanta z empirického vztahu pro řezivost [-],
T	...	trvanlivost nástroje [min],
m	...	exponent z Taylorova vztahu [-],
a_p	...	hloubka řezu [mm],
f	...	posuv [mm/ot],
x_{vc}	...	exponent z empirického vztahu pro řezivost [-],
y_{vc}	...	exponent z empirického vztahu pro řezivost [-].

Hodnocení stupně obrobiteľnosti je prováděno buď dle hodnot celkových, nebo přepočtených (měrných). Měření musí probíhat za přesně specifikovaných a neměnných podmínek (řezná rychlost, hloubka řezu, posuv, chlazení, atd.).

Pro tabelaci obrobiteľnosti je používán index kinetické obrobiteľnosti. Tato zkouška patří mezi základní a její výhodou je relativně vysoká objektivnost. Naopak slabou stránkou je časová náročnost a dle CNN (celostátní normy a normativy) použití jednoho etalonu pro značně rozdílné materiály. Její časovou náročnost zvyšuje i dosažení různých tříd obrobiteľnosti při využití různých metod obrábění. Třídy obrobiteľnosti viz níže. Již zmíněné CNN zde rozdělují technické konstrukční materiály do devíti skupin a označují je malými písmeny, viz tabulka 4.

Tab. 4 rozdělení konstrukčních materiálů do skupin.

Označení skupiny	Typy materiálů
a	litiny
b	oceli
c	těžké neželezné kovy, měď a slitiny mědi
d	lehké neželezné kovy, hliník a slitiny hliníku
e	plastické hmoty
f	přírodní nerostné hmoty
g	vrstvené hmoty
h	pryže
v	tvrze litiny pro výrobu válců

Pro každou tuto skupinu je dle CNN určen jeden etalonový materiál. Tedy materiál, se kterým je zkoumaný materiál dané skupiny porovnáván. Toto porovnání a zařazování do tříd obrobiteľnosti je prováděno pomocí již zmiňovaného indexu kinetické obrobiteľnosti viz rovnice 4. Etalon má tedy index obrobiteľnosti $i_o = 1$, střední hodnoty jednotlivých tříd

$$i_o = \frac{v_{15}}{v_{15et}} \quad (4)$$

jsou dány geometrickou řadou s kvocientem $q = 10^{\frac{1}{10}} \cong 1,26$ (etalonovému materiálu tedy odpovídá $q=1$).

kde:

v_{15} ... řezná rychlost pro sledovaný materiál při trvanlivosti břitu $T=15\text{min}$ [m/min]

v_{15et} ... řezná rychlost pro etalonový materiál při trvanlivosti břitu $T=15\text{min}$ [m/min].

Třídy obrobiteľnosti dle CNN jsou dány číslem, toto číslo se píše při značení obrobiteľnosti před malé písmeno označující skupinu materiálu. Nižší třídy obrobiteľnosti, tedy s kvocientem nižším než 1 jsou materiály lépe obrobitelné než materiál etalonu. Tedy čím nižší třída obrobiteľnosti tím je obrobitelnost lepší. Opačně platí, že materiály s kvocientem vyšším než 1 řadíme do skupin obrobiteľnosti vyšších a mají obrobitelnost horší než materiál etalonu. Tedy platí, že materiál řazený do nejvyšší skupiny obrobiteľnosti je nejhůře obrobitelný. Například materiály skupiny „b“, tedy oceli se třídí dle CNN do 20-ti tříd obrobiteľnosti, kde etalon má třídu obrobiteľnosti 14b, materiál s nejlepší obrobitelností (označován „1b“) má tedy kvocient $q = 10^{\frac{-13}{10}}$, kterému odpovídá střední hodnota 0,05 a materiál dané skupiny s nejhorší obrobitelností (označován „20b“) má kvocient $q = 10^{\frac{6}{10}}$ a tomu odpovídající střední hodnotu 4.

Samozřejmě existují i jiné systémy členění obrobiteľnosti. U jednotlivých systémů se mění kvocient, počet skupin obrobiteľnosti i materiál etalonů. Například z knihy M. Píšky porovnání systému značení obrobiteľnosti dle CNN a firmy Kennametal (dříve Widia), která užívá kvocient $q = 10^{\frac{1}{20}}$ uvedeno v tabulce 5.

Tab. 5 Porovnání značení obrobiteľnosti dle CNN a firmy Kennametal. [6]

CNN	18b	17b	16b	15b	14b	13b	12b	11b	10b	9b	12b	9b	8b	7b
Kennametal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	21-22	23	24-25	26
Druh oceli	uhlíkaté a slitinové 105 – 380 HB										vysoce legované a korozivzdorné 140-290HB			

Mezi další kritéria patří trvanlivost nástroje, kvalita povrchu, silové zatížení nástroje, což představuje zatížení nástroje silou řeznou, pasivní a posuvovou, dále teplota řezu, tvar třísky, či mnohé další. [6]

2.2 Obrobitelnost jednotlivých skupin korozivzdorných ocelí

Obrobitelnost korozivzdorných ocelí je závislá na chemickém složení a u některých druhů také na tepelném zpracování. Například feritické korozivzdorné oceli s obsahem chrómu do 20 % mají dobrou obrobitelnost, avšak při obsahu chrómu blížícím se k 30 % se obrobitelnost zhoršuje. Zhoršující se obrobitelnost je způsobena sklonem materiálu ke znečištění nástroje, tedy tříska ulpívá na nástroji v podobě nárůstků.[8]

Na opačném konci spektra korozivzdorných ocelí jsou oceli martenzitické. Ty jsou snadno obrobitelné především při obsahu uhlíku 0,15 % až 0,20 % a ve vyžíhaném stavu, kdy v porovnání s nízkolegovanou ocelí stačí jen nepatrně snížit řeznou rychlost. Avšak s rostoucím množstvím uhlíku dochází k růstu pevnostních charakteristik, zvyšuje se množství karbidů chrómu, které mají nepříznivý vliv na opotřebení, dochází tedy k vyššímu oděru nástroje. [1, 8]

Při bližší zkoumání korozivzdorných ocelí zjistíme, že především austenitické korozivzdorné oceli lze zařadit mezi těžkoobrobitelné. Jejich horší obrobitelnost je způsobena především velkým sklonem ke zpevňování za studena. Proto je zapotřebí odbírat větší množství materiálu, odpovídající alespoň hloubce zpevněné vrstvy materiálu. Doporučuje se také mazání za použití sulfochlorovaných olejů. V důsledku zpevňování a snaze odebírat třísku o velkém průřezu je zapotřebí při obrábění použít stroj, který se vyznačuje vysokou tuhostí a je dostatečně výkonný. Pro zjištění potřebného výkonu stroje lze vycházet ze silového zatížení nástroje při procesu řezání, které je měřeno v praktické části práce. Samozřejmě i upnutí obrobku musí být dostatečně tuhé, aby bylo dosaženo dostatečné tuhosti celé soustavy stroj-nástroj-obrobek. V opačném případě pokud by nebyla odebrána zpevněná vrstva obrobku, došlo by ke zpevnění povrchu, který byl již zpevněn průjezdem předchozím, a proto by se obrobitelnost dané vrstvy ještě více ztížila. K vyššímu zpevnění obráběného materiálu za studena může dojít i v případě, že používáme příliš tupý, či opotřebený nástroj. Mezi další charakteristické vlastnosti jsou dobrá tažnost a velký rozdíl mezi mezí kluzu a mezí pevnosti. Tyto vlastnosti mají vliv při tvorbě a oddělování třísky, ta se při procesu řezání silně zpevňuje, a také se nesnadno láme. Silně zpevněná tříska je samozřejmě těžko odstranitelná je značně rozměrná, proto je zapotřebí používat nástroje s utvařčem třísky. Výsledkem je lepší dělení třísky, se kterou lze lépe manipulovat. Korozivzdorné oceli jsou vysoce legované a výsledná ocel má nižší tepelnou vodivost v porovnání s uhlíkovou ocelí. Teplo, které se z velké části generuje v rovině stříhu, v důsledku nižší tepelné vodivosti se teplo v okolí nástroje hromadí. Z čehož vyplývá vysoké tepelné namáhání nástroje, především v oblasti ostří. [8]

Poslední zmíněnou skupinou jsou duplexní korozivzdorné oceli, které zastupují především austeniticko-feritické korozivzdorné oceli. Obrobitelnost těchto ocelí je lepší než u ocelí austenitických, jelikož i přítomnost ostrůvků či pásů feritu obrobitelnost zlepšují. Avšak výsledná řezná síla při srovnatelných podmínkách, je mnohem vyšší duplexní oceli, než u odpovídající oceli austenitické.[8]

2.3 Zlepšení obrobitelnosti

Zlepšit obrobitelnost jakékoliv korozivzdorné oceli je možné přidáním síry (S) nebo selenu (Se). Síra i selen tvoří vměstky sležené ze selenidů a sulfidů. Síra tvoří vměstky například společně s manganem a vytváří sulfid manganu. Přítomnost těchto vměstků přispívá ke snížení tažnosti a tím k lepší lámavosti třísky, také je dosahováno kvalitnějšího povrchu obrobku, snižuje součinitel tření mezi obrobkem a nástrojem, jelikož působí jako mazadlo a v neposlední řadě dochází k nižšímu opotřebení nástroje. Korozivzdorné oceli vhodné k třískovému obrábění lze dělit do dvou skupin a to oceli automatové a standardní oceli se zlepšenou obrobitelností. Tyto skupiny jsou rozdílné především množstvím síry. U automatové oceli obsahují 0,15 % až 0,35 % S, bohužel se zvyšující, se obsahem síry se korozivzdornost snižuje. Druhá skupina materiálu, tedy standardní korozivzdorné oceli se zlepšenou obrobitelností obsahují 0,015 % až 0,03 % S, což je pod mezním obsahem síry daným normou. U materiálů s řízenou morfologií lze správným nastavením velikosti, počtu a rozložení sulfidů v příčném průřezu, v porovnání se standardními korozivzdornými oceli s nižším obsahem síry dosáhnout vyšší řezné rychlosti a až dvojnásobné trvanlivosti břitu nástroje. V porovnání s automatovými oceli jsou, ale tyto hodnoty nižší. [1, 8]

Pokud je obrobitelnost zlepšena přidáním síry či selenu, dochází ke změně odolnosti vůči korozi. Tyto změny jsou zanedbatelné při použití v čisté atmosféře, ve vroucí kyselině octové, ve vroucí kyselině šťavelové a při většině použití v potravinářství. Avšak v prostředí obsahující chloridy, horkou kyselinu dusičnou, či mořské atmosféře tyto korozivzdorné oceli korodují. Pro zachování korozivzdornosti a zlepšení obrobitelnosti lze použít oceli s podílem mědi (Cu) v rozsahu 3 % až 4 % bez přísady síry a selenu. Například chromniklová ocel 1Cr17Ni11Mo2 se 3 % Cu vykazuje lepší obrobitelnost a současně lepší korozivzdornost než ocel bez přísady mědi. [8]

Zlepšit obrobitelnost je možné i jinými způsoby, například využitím deformačního zpevnění u feritických a austenitických korozivzdorných ocelí. Malým zpevněním na povrchu dosaženého například tažením se tvrdost v povrchové vrstvě mírně zvýší a v důsledku čehož se sníží rozdíl mezi mezí kluzu a mezí pevnosti což doprovází i zmenšení tažnosti. Zmenšená tažnost má pozitivní vliv na obrobitelnost. Vlastnosti v jádře materiálu, především u obrobků velkých průřezů zůstávají nezměněné. Tento postup není vždy vhodný, vhodnost je závislá na míře zpevnění. Při značném zpevnění dochází k razantně rychlejšímu opotřebení nástroje. [1]

2.4 Opotřebení řezného nástroje

K opotřebení dochází u všech strojních součástí, u které jsou v kontaktu a dochází mezi nimi k relativnímu pohybu. Jelikož proces řezání většinou probíhá za velmi vysokých tlaků a teplot, lze předpokládat také rychle opotřebení nástroje. U nástroje dochází především k pohybu mezi čelem nástroje a třískou, dále také mezi hřbetem nástroje a obrobkem a samozřejmě mezi ostřím a obrobkem. Proces opotřebení je komplexním problémem, který ovlivňuje mnoho faktorů, mezi nejvýznamnější patří mechanické vlastnosti, chemické složení a struktura jak nástrojového tak i obráběného materiálu, dále například geometrie řezného nástroje, pracovní podmínky, a mnoho dalších. Mezi základní mechanismy opotřebení se řadí. [5]:

- abraze, opotřebení otěrem, zde mají největší vliv na opotřebení tvrdé částice vyskytující se v místě styku nástroje s obrobkem popřípadě třískou, tedy tvrdé mikročástice obráběného materiálu, ale také mikročástice uvolnění z nástroje,
- adheze vzniká v důsledku působení vysokých teplot a tlaků na výčnělcích stykových ploch, mezi kterými vznikají mikrosvary, ty takřka okamžitě praskají,
- difúze probíhá v místě styku dvou materiálů za vysokých teplot, dochází zde k migraci atomů mezi těmito materiály a tím vznikají nežádoucí chemické sloučeniny, výsledkem jsou zhoršené mechanické vlastnosti nástroje,
- oxidace, reakce povrchu nástroje s kyslíkem, kdy vznikají na povrchu oxidy materiálu nástroje,
- plastická deformace vzniká následkem působení vysokých tlaků za teploty, které se v oblasti ostří v průběhu času kumulují, s přibývajícím opotřebem se teplota a tlak zvyšují a mají za následek ještě vyšší rychlost opotřebení,
- křehký lom vzniká především u nástrojů s nízkou houževnatostí při přerušovaném řezu, nehomogenním materiálu obrobku, působením nárustků, či působením vibrací.

V průběhu vzniku a zvyšování opotřebení dochází k úbytku materiálu na nástroji a tím i ke změně jeho geometrie. Pro určení trvanlivosti břitů nástroje toto opotřebení měříme a vyhodnocujeme. Standardně se využívají kritéria opotřebení hřbetu hlavního nástroje označované jako VB. Pro soustružení je trvanlivost nástroje měřena do opotřebení $VB = 0,2 \text{ mm}$. Při vyhodnocování trvanlivosti při frézování je mezní hodnota $VB = 0,3 \text{ mm}$. Tyto kritéria jsou platná, pokud nedojde k jinému poškození nástroje ovlivňující jeho funkčnost. Při zkouškách trvanlivosti občas dochází po určité době ke křehkému lomu v oblasti ostří.

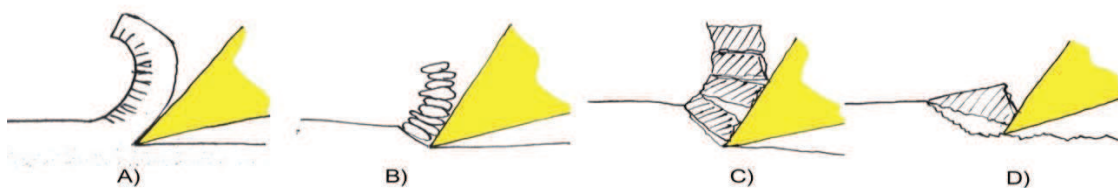
2.5 Třísky, její tvary a hodnocení

Při procesu obrábění je získáváno kromě obrobku požadovaného tvaru, rozměru a jakosti i určité množství odpadu ve formě třísky. Množství třísky je závislé na tvaru součásti a použitém polotovaru. Všeobecně lze říci, že při použití normalizovaných profilů dostáváme relativně větší množství třísky než při použití polotovaru ve formě výkovku či odlitku. Rozhodování o použitém polotovaru však patří k rozhodnutí týkajících se hospodárnosti.

Pokud je hodnocena tříška samotná, je nejčastěji posuzován její tvar. Tvar třísky lze ovlivnit například volbou materiálu, ten bývá však často specifikován pro daný výrobek a při obrábění ho nelze libovolně měnit. Dalšími faktory, které již při procesu obrábění lze ovlivnit je geometrie řezného nástroje, řezné podmínky a interakce mezi obrobkem a nástrojem na tribologickém rozhraní. Pokud je diskutováno o geometrii řezného nástroje, tvar třísky je ovlivňován úhlem čela, kdy záporný uhel čela zlepšuje lámavost třísky, ale zároveň zhoršuje kvalitu povrchu. V rámci geometrie má vliv i úhel nastavení, při jehož zvětšování se zlepšuje lámání třísky. Z řezných podmínek má na tvar třísky vliv řezná rychlost, při jejím růstu dochází k tvorbě třísky horšího tvaru a velikost posuvu, kdy při zvyšování posuvu je lámavost třísek vyšší, avšak dochází ke zhoršování drsnosti povrchu, viz předchozí kapitola. Pro zlepšení tvaru třísky, tedy pro její lámání na menší kousky je používán utvařec třísky umístěný na čele nástroje. Třísku lze také usměrňovat na hřbetní plochu, o kterou se tříška láme, nebo plochu obrobenou, ale to je možné jen při hrubovací operaci z důvodu zhoršení kvality povrchu. [9]

V závislosti na uvedených faktorech se lze setkat s těmito druhy třísky viz obrázek 4:

- A) plynulá soudržná,
- B) článkovitá soudržná,
- C) nesoudržná, elementární,
- D) tříška netvářená.



Obr. 4 typy třísek.

Pro praxi je velice důležitý ukazatelem objemový součinitel třísek (W), dle tohoto součinitele lze stanovit, zda požadovaný tvar třísky je vyhovující. Tento součinitel se vypočítá dle vzorce 5. Součinitel je podíl, kde ve jmenovateli je objem odebraného materiálu (V_m), korespondující s objemem volně ložených třísek (V_t), který je v čitateli.

$$W = \frac{V_t}{V_m} \quad (5)$$

Dle tvaru třísky lze se pohybovat tento součinitel objemu třísek od 5 pro elementární třísky, přes hodnoty od 50 do 150 pro vinuté třísky se součinitelem dle jejich délky až do hodnot kolem 500, kterých dosahují třísky stužkové. [9]

2.6 Hodnocení efektivnosti frézovacích nástrojů

Užitné vlastnosti nástrojů se při vývoje neustále zlepšují, ať se jedná o nástroje ze slinutých karbidů, řezné keramiky, či kubického nitridu bóru. Avšak při vývoji dochází často ke zvyšování ceny nástroje, což má negativní vliv na jeho efektivnost. Lze tedy říct, že efektivnost řezného nástroje lze chápat, jako náklady vynaložené na odebrání určitého objemu materiálu při zajištění potřebné kvality povrchu a geometrie obrobku. Při snaze o dosažení maximální efektivnosti nástroje se začali využívat nástroje ze slinutých karbidů, které nevynikají trvanlivostí břitů, ale umožňují obrábění relativně vysokou řeznou rychlostí a velkým úběrem třísky. Další výhodou použití nástrojů ze slinutých karbidů je jejich široký rozsah použití, kdy lze různými druhy VBD ze slinutých karbidů obrábět materiály snadno obrobitelné jako například hliník, ale také materiály těžkoobrobitelné, jako jsou slitiny titanu, niklu, kobaltu, či některé korozivzdorné oceli.

Pro hodnocení efektivnosti frézování, lze použít výpočet pro určení nákladů na jednotku odebraného materiálu. Pro tento výpočet byl zvolen vzorec, který neobsahuje teoretické hodnoty. Teoretiky lze zde vypočítat trvanlivost nástroje z Taylorova vztahu. Při použití tohoto vztahu by však došlo k zne přesnění výsledků a výsledná efektivita srovnatelných nástrojů by záležela především na pořizovací ceně vyměnitelných břitových destiček. Z tohoto důvodu bylo vycházeno z naměřené trvanlivosti VBD. Pro výpočet při známe trvanlivosti ostří, úběru materiálu za jednotku času a nákladech na pořízení VBD, lze použít vzorec 9. Pokud je úběr materiálu za jednotku času neznámý, můžeme jej zjistit dosazením řezných podmínek, při kterých byla naměřena trvanlivost nástroje, do vzorce 6 a 7. Následným dosazením do vzorce 8 získáme nákladů na jednotku odebraného materiálu, které je cílem minimalizovat.

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (6)$$

$$Q = \frac{a_e \cdot v_f \cdot a_p}{10^3} \text{ [cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (7)$$

$$N_e = \frac{10^3 \cdot z \cdot \frac{N_p}{q}}{T \cdot Q} \text{ [Kč} \cdot \text{dm}^{-3}] \quad (8)$$

kde:

v_f	...	posuvová rychlost	[m · min ⁻¹],
f_z	...	posuv na zub	[mm],
z	...	počet zubů frézy	[-],
n	...	otáčky	[min ⁻¹],
U	...	úběr obráběného materiálu	[cm ³ · min ⁻¹],
a_e	...	šířka frézované plochy	[mm]
a_p	...	hloubka řezu	[mm]
N_e	...	náklady na jednotku objemu obrobce	[Kč · dm ⁻³]
N_p	...	pořizovací cena břitové destičky	[Kč]
q	...	počet ostří břitové destičky	[-]
T	...	trvanlivost jednoho ostří	[min]

2.7 Doporučení při frézování

Následující doporučení platí pro všechny typy korozivzdorných ocelí. Avšak při obrábění duplexních korozivzdorných ocelí nabývají tyto doporučení ještě většího významu než u ostatních typů. Pro obrábění korozivzdorných ocelí se doporučuje[10]:

- použít výkonný stroj, výkon vyšší než pro obrábění běžných uhlíkových ocelí,
- použít stroj s vysokou tuhostí, upnutí nástroje a obráběného dílce musí být taktéž extrémně tuhé a silné,
- minimalizovat vibrace použitím pokud možno co nejkratším nástrojem,
- používat nástroj, který má minimální potřebný rádius špičky nástroje,
- upřednostnit se nástroje ze slinutých karbidů s ostrým ostřím, která musí být dostatečně pevná,
- hloubka řezu při obrábění musí být vždy větší, než je hloubka zpevněné vrstvy, která vyplývá z předešlého průchodu nástroje,
- použít vysokou, ale zároveň přiměřenou řeznou rychlost, aby nevznikaly nárůstky na ostří a nedocházelo k rychlému opotřebení,
- vyměňovat břitovou destičku nebo přeastřovat ostří v plánovaných intervalech, aby byla zajištěna ostrost ostří,
- použít chladicí a mazací procesní kapalinu v hojném množství, přívod řezného oleje, či emulze vysokým tlakem,
- procesní kapalinu (řezný olej, emulzi) přivádět pod vysokým tlakem pro zajištění dostatečného mazání a chlazení,
- používat vyměnitelné břitové destičky s pozitivní geometrií utvařeče třísky.

3 POPIS POUŽITÉHO ZAŘÍZENÍ, STROJ – NÁSTROJ – OBROBEK

V této kapitole jsou popsány obráběcí stroje, nástroje, obráběné materiály a měřicí zařízení použité v průběhu jednotlivých zkoušek.

3.1 Obráběcí stroje

Na zkoušky byly použity dva stroje. Většina funkčních zkoušek bylo provedeno na zkušebně firmy Pramet Tools. Jediným měřením provedeno mimo tuto zkušebnu bylo měření rezných sil, které bylo provedeno v areálu VUT.

3.1.1 Kovosvit MAS, MCV 1270 Power

Zkušebna firmy Pramet, ve které byly prováděny zkoušky je vybavena frézovacím CNC centrem MCV 1270 Power od výrobce Kovosvit MAS, Sezimovo Ústí (obr. 5). Tento stroj je vybaven řídicím systémem Heidenhain iTNC 530. Technické parametry frézovacího centra jsou uvedeny v tabulce 6.



Obr. 5 frézovací CNC centrum MCV 1270 Power, výrobce Kovosvit MAS.

Tab. 6 technické parametry frézovací CNC centrum MCV 1270 Power, výrobce Kovosvit MAS.

Parametr	jednotka	hodnota
Stroj		
počet míst v zásobníku	ks	24 (ISO 50), 30 (ISO 40)
rozměry (délka x šířka x výška)	mm	5000 x 3600 x 3330
hmotnost	kg	11 500
Pracovní stůl		
upínací plocha stolu (délka x šířka)	mm	1500 x 670
max. zatížení stolu	kg	1200
pracovní rozsah X x Y x Z	mm	1270 x 610 x 720
Vřeteno		
Výkon motoru S1 / S6 – 25 % (40 %)	kW	28 / 43 (ISO 40); 28 / 43 (ISO 50)
jmenovitý krouticí moment S1 / S6 – 40 %	Nm	406 / 623
maximální otáčky	ot / min	8000

3.1.2 OSO, FV25CNC A

Pro provedení zkoušek byla využita i učebna VUT. Zde jsme využily frézku FV25CNC A od firmy Obráběcí stroje Olomouc (OSO). Jedná se o číslicově řízenou tříosou univerzální frézku, řízenou softwarem firmy Heidenhain. Na tomto stroji byly pomocí dynamometru měřeny řezné síly při frézování. Na obrázku 6 je stanoviště této CNC frézky, přehled jejích parametrů je uveden v tabulce 7.



Obr. 6 Frézka OSO, FV25CNC A.

Tab. 7 technické parametry CNC frézky FV25CNC A, výrobce OSO Olomouc.

Parametr	jednotka	hodnota
Stroj		
počet míst v zásobníku	ks	ruční výměna nástrojů
rozměry (délka x šířka x výška)	mm	2588 x 2750 x 2300
hmotnost	kg	1500
Pracovní stůl		
upínací plocha stolu (délka x šířka)	mm	1300 x 350
max. zatížení stolu	kg	200
pracovní rozsah X x Y x Z	mm	760 x 380 x (152+420)
Vřeteno		
Upínací kužel	---	ISO 40
Výkon motoru	kW	5,5
maximální otáčky	ot / min	6000

3.2 Nástroje pro obrábění korozivzdorné oceli

Pro obrábění korozivzdorných ocelí jsou z hlediska geometrie VBD charakteristické dva tvary VBD, kterými jsou destičky čtvercové s pozitivní geometrií a kruhové destičky s pozitivní geometrií.

Vyměnitelné břitové destičky at' čtvercové nebo kruhové jsou charakteristické úhlem hřbetu, zpravidla o velikosti 20°, díky němuž je možné pozitivní nastavení ostří. Další charakteristické geometrické parametry jsou například šířka fazetky, zaoblením ostří, dále pozitivním úhlem na čele VBD a provedením plochy čela, tedy použitím a tvarem utvařeče. Samozřejmě se používají i jiné tvary VBD a lze se setkat i s různými hodnotami úhlu hřbetu, například v sortimentu firmy Seco je pro frézování VBD s označením OFEX05T305TN-ME07 tedy oktagonální destička s úhlem hřbetu 25°. Větší úhel hřbetu umožňuje vyšší pozitivní hodnoty axiálního úhlu nastavení čela vyměnitelné břitové destičky. Hlavní předností nástroje s vyšším axiálním úhlem nastavením čela může být snížení řezných sil nebo i menší sklon kulpívání materiálu ve formě nárůstků, které negativně ovlivňují trvanlivost ostří.

Základní charakteristickým rysem pro všechny nástroje pro obrábění korozivzdorných ocelí je pozitivní geometrie. Ta se taktéž nazývá ostrou geometrií. Geometrie tělesa frézovacího nástroje se vyznačují vysoce pozitivním axiálním úhlem nastavení lůžka. Radiální úhel nastavení lůžka už není tak jednoznačný, ale ve většině případů nabývá hodnot od mínus pěti stupňů až do plus pěti stupňů, tedy radiální úhel nastavení lůžka je používán jak negativní tak i pozitivní. Avšak VBD zachovávají trend a vyznačují se taktéž pozitivní (ostrou) geometrií. Při kompletaci nástroje pak dostáváme velice pozitivní úhly nastavení především v axiálním směru. Použitím ostré geometrie a vhodného utvařeče jsou minimalizovány negativní vlivy při procesu řezání a to především sklon kulpívání nárůstků a zadírání materiálu obrobku.

V oblasti rovinného frézování je dnes nabízeno velké množství konstrukčních řešení. Pokud se zaměříme na světové trendy, nalezneme dvě nejvyužívanější konstrukční řešení. Tyto řešení jsou dělena dle tvaru vyměnitelné břitové destičky na:

- a) Čtvercového tvaru, tedy při označení dle ISO 513 začínající písmenem S,
- b) Kruhového tvaru a oktagonální, označení začínající písmenem R, či O.

Čtvercové vyměnitelné břitové destičky jsou na dnešním trhu s největší pravděpodobností nejrozšířenější, pokud se zaměříme na rovinné frézování materiálů skupiny „M“. Hlavní výhodou vyměnitelných břitových destiček čtvercového tvaru je pro zákazníky především nízká cena. Další výhodou je spojena s nízkou cenou, jelikož při poškození většího rozsahu, tedy pokud není možno využít zbylé ostří, nedochází k tak vysoké ztrátě jak při použití vyměnitelných břitových destiček oktagonálních.

3.2.1 Popis a charakteristika použitých nástrojů

Pro zhotovení zkoušek byly navrženy frézy průměru 63mm, vhodné pro frézování korozivzdorných ocelí s možností osazení oktagonálními VBD. Další specifikace byla rozdílná a přesné vymezení použitých nástrojů proběhlo po první sérii zkoušek, kdy byly srovnávány návrhy nástrojů firmy Pramet Tools.

V první části zkoušek byly otestovány na trvanlivost břitu nástroje firmy Pramet Tools, jednalo se o dvě frézy s různou geometrií v kombinaci s čtyřmi VBD rozdílné geometrie.

VBD s jednotlivými geometriemi byly ozkoušeny ve dvou různých materiálech. Po provedení těchto zkoušek bylo rozhodnuto o použití varianty z materiálu M9340 s CVD povlakem.

V další části testů pro zvolené řešení efektivního frézování korozivzdorných ocelí firmy Pramet Tools byly vybrány srovnatelné nástroje předních světových výrobců. Jednalo se o frézy průměru 63mm, jež jsou dle výrobce vhodné pro frézování korozivzdorných ocelí s možností osazení oktagonálními VBD s úhlem hřbetu 20°, což bylo známo již před prvními testy. Dále tato specifikace byla po první sérii testů zúžena na VBD s povlakem naneseným technologií CVD. Pro srovnání byly vybrány frézy firem Iscar a Mitsubishi, základní technické parametry použitých fréz jsou v tabulce 8, nechybí zde ani přehled použitých VBD, viz tabulka 9.

Tab. 8 Základní technické parametry použitých fréz udávané výrobcem. [12, 13]

Výrobce	Označení frézy	Úhel nastavení κ_r [°]	geometrie γ_p / γ_f [°/°]
MITSUBISHI	0634ARB OCTACUT	42	+13 / -4
PRAMET	63A04R-S45OE06Z-C-P01	43	+10 / +6
	63A04R-S45OE06Z-C-P02	43	+10 / -4
ISCAR	F45KT D063-22-R06	42	+15 / +2

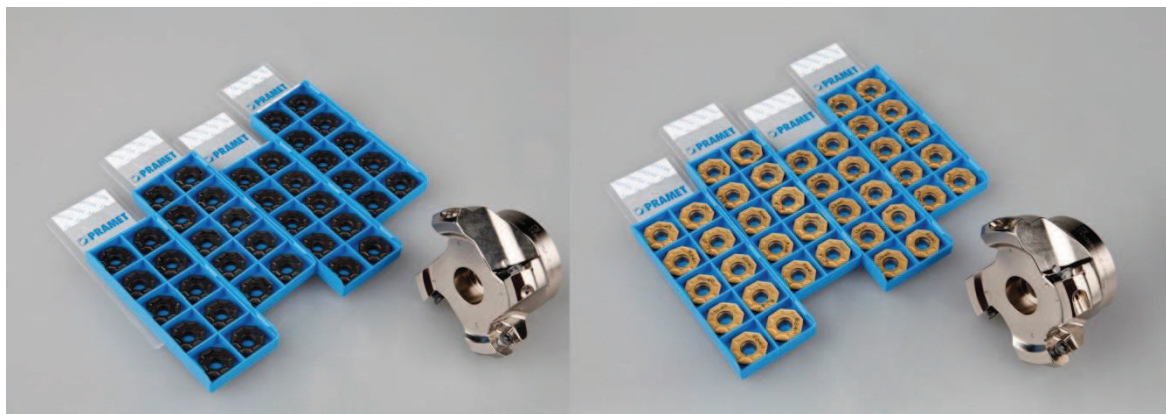
Dále je uveden podrobnější popis jednotlivých použitých nástrojů. Pro jednotlivé typy vyměnitelných břitových destiček byl naměřen profil hlavního ostří, měření proběhlo kolmo na hlavní ostří a to v jeho středu. Pro změření profilu hlavního ostří byl použit přístroj s označením Perthometer PCV od výrobce Mahr. V této práci jsou použity výkresy, které byly vytvořeny přímo v softwaru dodávaném k tomuto zařízení. Na tomto zařízení bylo naměřeno také provedení ostří na jednotlivých vyměnitelných břitových destičkách použitých při provádění jednotlivých zkoušek. Pro měření provedení ostří byl použit software Seco Tools Cutting Edge Measuring System. Provedení jednotlivých ostří je uvedeno v příloze 1.

Tab. 9 Základní technické parametry použitých VBD dávané výrobcem. [11, 12, 13]

Výrobce	označení VBD	materiál	max. hloubka řezu a_p [mm]	posuv na zub f_z [mm]
MITSUBISHI	OEMX 12T3ESR1	F7030	2,5	0,05 – 0,20
	OEMX 12T3ETR1-JS	F620	2,5	0,05 – 0,20
	OEMX 12T3EER1-JS	F7010	2,5	0,05 – 0,20
PRAMET	OEHT 0604AESR-MM-P01	M9340	4	0,08 – 0,25
	OEHT 0604AESR-MM-P02	M9340	4	0,08 – 0,25
	OEHT 0604AESR-MM-P03	M9340	4	0,08 – 0,25
	OEHT 0604AESR-MM-P04	M9340	4	0,08 – 0,25
	OEHT 0604AESR-MM-P01	8240 (PVD)	4	0,08 – 0,25
	OEHT 0604AESR-MM-P02	8240 (PVD)	4	0,08 – 0,25
	OEHT 0604AESR-MM-P03	8240 (PVD)	4	0,08 – 0,25
	OEHT 0604AESR-MM-P04	8240 (PVD)	4	0,08 – 0,25
ISCAR	OEMT 060405AER-76	IC4050	2,5	0,12 – 0,20

3.2.2 Pramet Tools

Nástroje společnosti Pramet jsou prototypy oktagonální frézy. Úkolem těchto zkoušek bylo zjistit funkční vlastnosti těchto fréz, vybrat nejvhodnější řešení s ohledem na efektivnost frézování a toto řešení srovnat s konkurencí. Zkoušeny byly dvě frézy s různou geometrií a to 63A04R-S45OE06Z-C-P01 a 63A04R-S45OE06Z-C-P02, tyto frézy byly postupně osazeny čtyřmi typy VBD s označením OEHT0604AESR-MM-P01, OEHT0604AESR-MM-P02, OEHT0604AESR-MM-P03 a OEHT0604AESR-MM-P04. Jednotlivé typy VBD byly vyhotoveny ve dvou druzích materiálu. Na obr. 7 jsou zleva fréza OEHT0604AESR-MM-P01, OEHT0604AESR-MM-P02 a dále VBD z materiálu M9340 s CVD povlakem vlevo a VBD z materiálu 8420 s PVD povlakem vpravo.



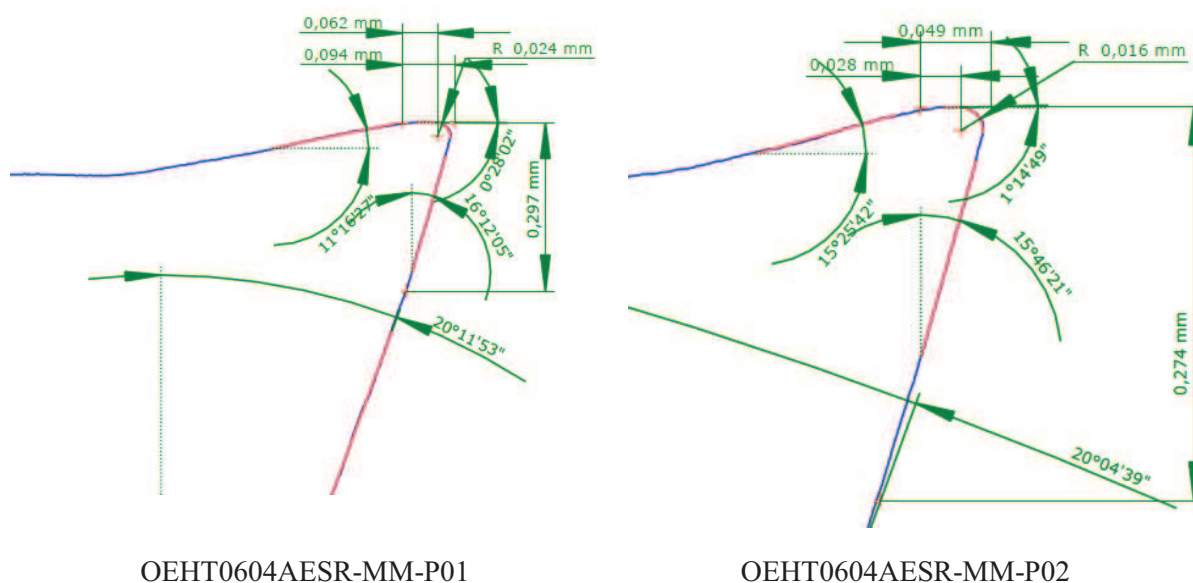
Obr. 7 použité nástroje firmy Pramet.

Frézy z hlediska vlastní konstrukce jsou řešeny jako nástrčné upínané centrálním šroubem do sklíčidla či upínače. Rozměry upínací části jsou u obou fréz totožné. Průměr obou fréz je 63 mm a destičky jsou upínány v obou případech rovněž šrouby. Úhel nastavení hlavního ostří κ_r je u obou fréz shodný 43° . Jednotlivé frézy jsou rozdílné především úhlem nastavení lůžka. Fréza 63A04R-S45OE06Z-C-P01 má axiální úhel nastavení lůžka i radiální úhel nastavení lůžka pozitivní na rozdíl od frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P02, která má axiální úhel nastavení lůžka taktéž pozitivní, ale radiální úhel nastavení lůžka je negativní. Jednotlivé rozměrové parametry fréz byly měřeny a jsou uvedeny v příloze 2.

Fréza byla osazena oktagonální VBD, pokud se u těchto VBD zaměříme jen na označení, tak jsou totožné, ale při podrobnějším zkoumání zjistíme, že jednotlivé VBD se navzájem liší úhly na čele a provedením utvařeče. Mezi shodné parametry patří úhel hřbetu 20° , provedení, výrobní tolerance vnější rozměry a provedení ostří, která je zaoblená s fazetkou. Tyto destičky byly vyrobeny ve dvou verzích první z materiálu 8240 a druhá verze z materiálu M9340.

Materiál 8240 je nejhouvernatějším materiálem z materiálové řady 8000. Na povrchu této VBD je nanášen povlak TiAlN metodou PVD. Tento materiál se využívá pro těžké frézování, nestabilní podmínky i při hrubém nerovném povrchu. Hlavní předností je vysoká provozní spolehlivost vysoká pevnost a nízký koeficient tření. Široký je taktéž rozsah použití, kdy parametry obráběcího procesu jsou vysoce závislé na použité VBD, rozmezí hloubky řezu a_p je v rozmezí 1 mm až 15 mm, posuv na zub $f_z = 0,1 - 0,6$ mm a řezná rychlost se pohybuje v rozmezí 80 – 150 m/min. Uvedené hodnoty jsou pro frézování korozivzdorných ocelí, tento materiál však umožňuje obrábět i oceli a litiny.

Druhé provedení destiček firmy Pramet Tools bylo z materiálu M9340. Jedná se o zástupce nové řady materiálů M9300. Substrát materiálu je tvořen středně zrným wolframem s nízkým podílem chromu. Tento materiál je charakteristický vysokým obsahem kobaltu, díky němuž je velice houževnatý. Z dané řady materiálů je tento jednoznačně nejhouževnatější. Je vhodný pro obrábění korozivzdorných ocelí nižší řeznou rychlostí i za nestabilních podmínek jako jsou vibrace a přerušovaný řez. Odolnost povrchu VBD proti opotřebení zlepšuje relativně tenký CVD povlak aplikovaný technologií MT-CVD, ten je kombinací TiCN a povrchové vrstvy Al_2O_3 .



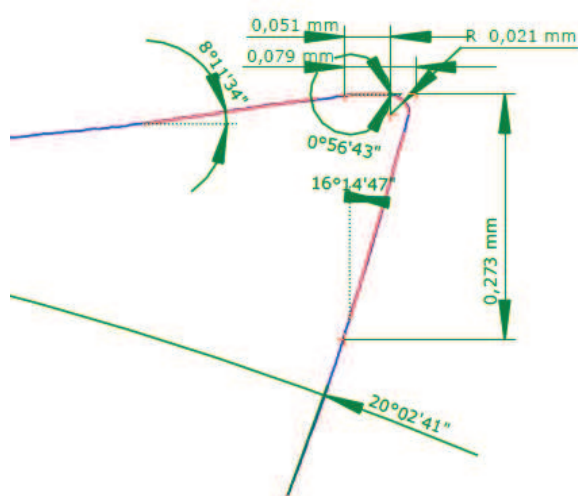
Obr. 8 Profil hlavního ostří VBD OEHT 0604AESR-MM-P01 a P02 Pramet Tools.

Profil hlavního ostří jednotlivých vyměnitelných břitových destiček má ve všech variantách zaoblené ostří s fazetkou. Samozřejmostí je úhel hřbetu nástroje 20° , který odpovídá v označení písmenu E. Všechny zkoušené vyměnitelné břitové destičky firmy Pramet Tools mají na čele utvařecí třísky, který nejen mění tvar třísky, ale snižuje i její ulpívání na čele nástroje.

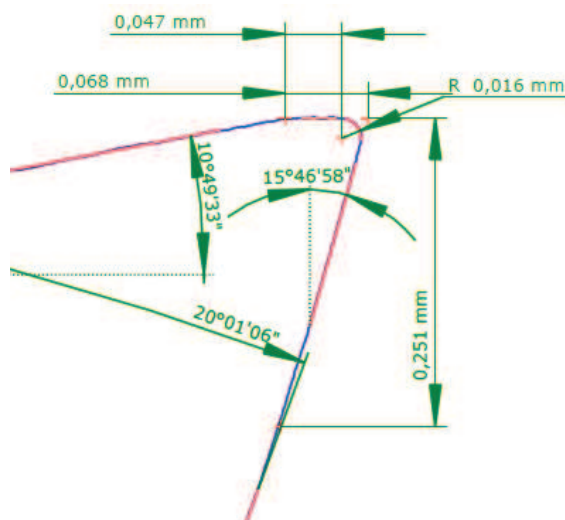
Vyměnitelná břitová VBD OEHT 0604AESR-MM-P01 má poloměr zaoblení ostří 0,024 mm, na které navazuje takřka neskloněná fazetka o šířce 0,062 mm a úhel čela 11° . zaoblení největší, avšak při porovnání s ostatními zkoušenými nástroji patří hodnoty těchto rozměrů mezi nejmenší.

Nejvíce ostrou geometrií má břitová destička VBD OEHT 0604AESR-MM-P02, která má zaoblené ostří o poloměru 0,016 mm a fazetku o šířce pouze 0,028 mm, současně má nejvyšší pozitivní úhel čela, a to $+15^\circ30'$.

Provedení ostří je u všech prototypů podobné, rozdíly jsou jen v desetínách milimetrů jak u rozměru zaoblení ostří, tak i u šířky fazetky. Větší rozdíly pozorujeme jen v úhlu sklonu čela. Mezi zajímavosti patří hřbetní fazetka se sklonem 16° široká 0,25–0,30 mm, která zvyšuje pevnost ostří.



OEHT0604AESR-MM-P03



OEHT0604AESR-MM-P04

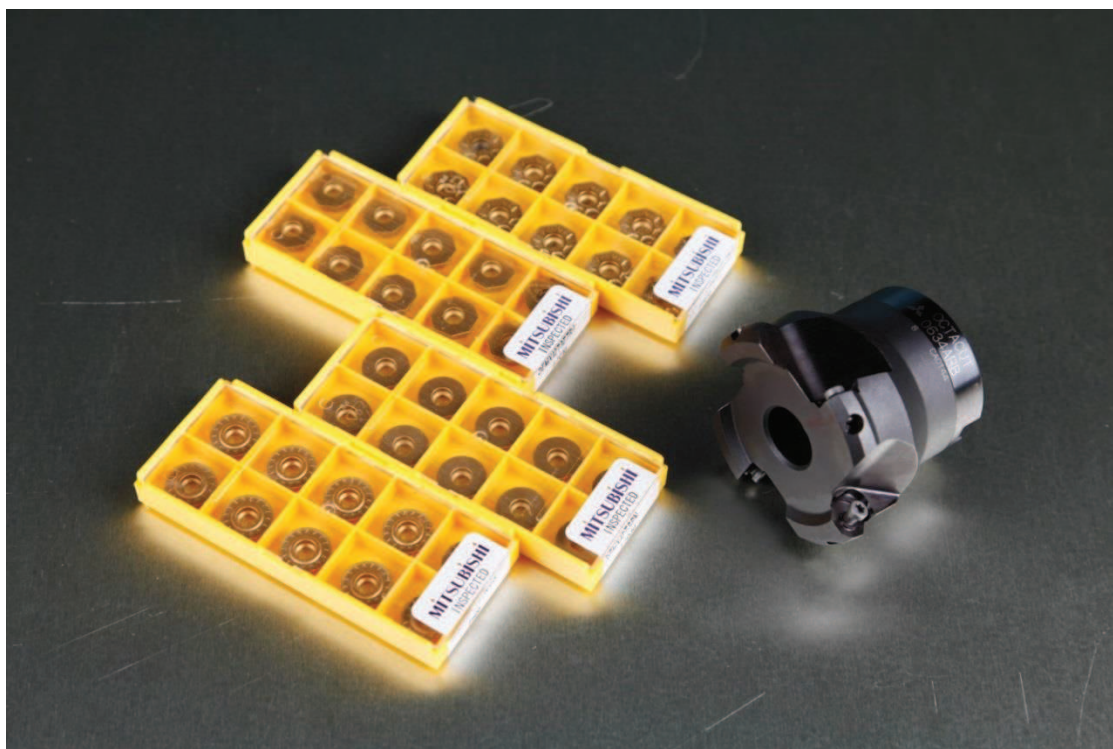
Obr. 9 Profil hlavního ostří VBD OEHT0604AESR-MM-P03 a P04 Pramet Tools.

Profil hlavního ostří v případě vyměnitelné břitové destičky OEHT 0604AESR-MM-P03 odlišuje od předchozí menším pozitivním úhlem čela která je jen 8° . Poloměr zaoblení ostří je 0,021 mm, na nějž navazuje opěr rovná fazetka šířky 0,051 mm.

Poslední použitou vyměnitelnou břitovou destičkou je OEHT 0604AESR-MM-P04 s poloměrem zaoblení ostří 0,016 mm, fazetkou šířky 0,47 mm a úhlem čela 11° .

3.2.3 Mitsubishi Materials

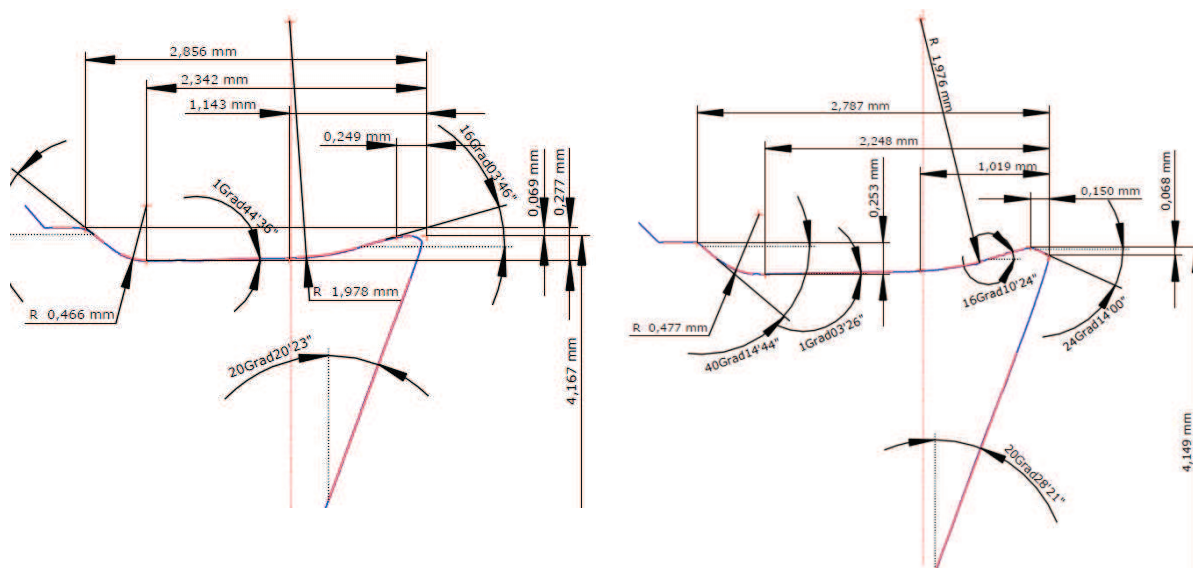
Nástroje od japonské společnosti Mitsubishi Materials patří mezi absolutní světovou špičku. Z nabídky byla vybrána fréza vhodná pro frézování korozivzdorných ocelí s podobnou charakteristikou jako nástroje firmy Pramet. Pro srovnání byla vybrána fréza ze série OCTACUT MM. Jelikož jsou srovnávány čtyřzubé frézy o průměru $D = 63 \text{ mm}$ byla z této série vybrána fréza s označením OCTACUT0634ARB. Fréza, viz obrázek 10. Na této fréze byly vyzkoušeny tři typy VBD.



Obr. 10 Fréza Mitsubishi OCTACUT0634ARB.

Tato fréza má široké použití a je dle výrobce vhodná pro frézování litin, uhlíkových ocelí, legované oceli, korozivzdorné oceli a některých ocelí vysoké tvrdosti. Z hlediska konstrukce se jedná o čelní frézu a je řešena jako nástrčná. Upnutí do sklíčidla či upínače se provádí pomocí centrálního šroubu. Upnutí VBD opět pomocí šroubů. Povrch frézy je černěn. Úhel nastavení hlavního ostří je 42° . Lůžko má axiální úhel nastavení pozitivní a to $+13^\circ$. Radiální úhel nastavení lůžka je -4° , je tedy negativní. Reálné hodnoty průměru úhlů nastavení a radiální a axiální házivosti jsou v příloze 2.

Z parametrů udávaných výrobcem se lze dočíst, že do této frézy je možnost i kruhové vyměnitelné břitové destičky. Avšak pro porovnání byly vybrány jen oktagonální, porovnáním oktagonálních a kruhových VBD bylo zamítnuto. S ohledem na zachování stejné kategorie VBD, tedy VBD s počátečními písmeny označení „OE“. Geometrie dvou vybraných VBD byla takřka totožná. V rámci geometrie byly rozdílné pouze provedením ostří, viz profily hlavního ostří. Další použitou VBD byla OEMX12T3ESR1, kde „S“ značí zaoblené ostří s fazetkou. Poslední použitou VBD je OEMX12T3EER1-„JS“, provedení ostří „E“ značí zaoblené ostří, tentokrát s utvařečem třísky „JS“. Přehled materiálu VBD a ostatních parametrů viz tabulka 9. Reálné hodnoty provedení ostří jsou v příloze 1.



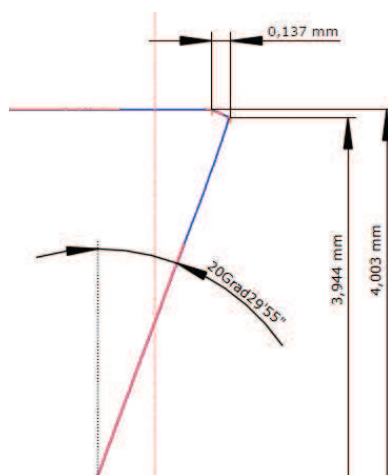
OEMX 12T3EER1-JS

OEMX 12T3ETR1-JS

Obr. 11 profil hlavního ostří VBD OEMX 12T3EER1-JS a ETR1-JS Mitsubishi Materials.

Jednotlivý druhy použitých vyměnitelných břitových destiček jsou rozdílné především provedením ostří. Provedení ostří odpovídá označení vyměnitelných břitových destiček. Například u OEMX 12T3EER1-JS je písmenem E udává zaoblené ostří. Ačkoliv na tomto měření není zakótována hodnota zaoblení, v měření které je v příloze 1 je hodnota zaoblení 0,04 mm. Jelikož zaoblení ostří neodpovídá kruhové výseči, byla zde naměřena i fazetka šířky 0,2 mm. Za fazetkou je čelo skloněno v pozitivním směru pod 16°.

Další hodnocenou vyměnitelnou břitovou destičkou byla OEMX 12T3ETR1-JS, tato destička má pouze s fazetkou. Ta je zde relativně široká, skloněná v negativním směru pod úhlem 24°. Úhle čela je i ostatní rozměry jsou totožné s OEMX 12T3EER1-JS. Díky totožné geometrii, lze porovnávat vliv rozdílného provedení ostří.



Obr. 12 Profil hlavního ostří VBD OEMX 12T3ESR1 Mitsubishi Materials

Vyměnitelná břitová destička OEMX 12T3ESR1 má ostří zaoblené s fazetkou. Zaoblení ostří i fazetka je naměřena v příloze 1, hodnota zaoblení ostří je přibližně 0,017 mm a fazetka s negativním sklonem je šířky 0,12 mm. Čelo je u této vyměnitelné břitové destičky jako jediné zkoušené od firmy Mitsubishi Materials rovné, bez utvařeče třísky.

3.2.4 Iscar

Od izraelské firmy Iscar byl zvolen nástroj typu F45KT, který je vyráběn v rozsahu průměrů od 50 do 125 mm. Pro testování byla vybrána fréza průměru 63 mm, s označením F45KT D063-22-R06, tedy fréza stejného průměru jako frézy ostatních konkurentů. Počet zubů frézy je však pět, má tedy o jeden zub na fréze více, než konkurence. Na tuto změnu je brán zřetel a byla navyšována posuvová rychlost, pro získání konstantního posuvu na zub u všech nástrojů. Tato fréza byla testována v kombinaci s jediným druhem VBD OEMT 060405AER-76. Na obr. 13 je zvolená fréza F45KT D063-22-R06 se sortimentem oktagonálních a kruhových VBD, pro naše testy byly použity jen destičky OEMT 060405AER-76, které jsou v první krabičce zprava.



Obr. 13 fréza Iscar F45KT D063-22-R06 se sortimentem VBD.

Z hlediska konstrukce frézy je jako v ostatních případech řešena jako nástrčná, upínána do sklíčidla či upínače centrálním šroubem. VBD jsou na frézu upínány pomocí šroubů. Na frézu je možno upnout mimo VBD oktagonálních, také kruhové. Z hlediska geometrie má tato fréza největší axiální úhel nastavení lůžka ze zkoušených fréz a to $+15^\circ$, radiální úhel nastavení lůžka je $+2^\circ$ a je tedy také pozitivní. Úhel nastavení hlavního ostří vůči obrobku κ_r je 42° . Reálné parametry naměřené na zkoušené fréze jsou uvedeny v příloze 2.

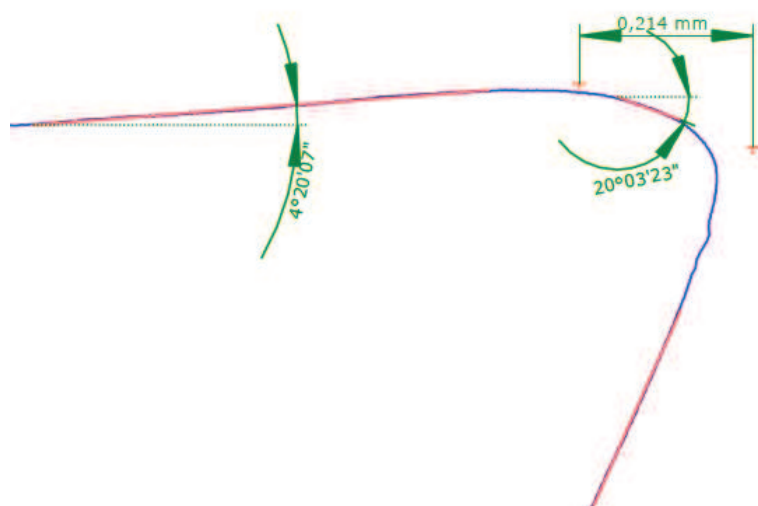
Při provádění zkoušek byly využity jen VBD OEMT 060405AER-76 z materiálu IC4050. Ostatní VBD byly zahrnuty do jiné části testování, jelikož se odlišovali použitým povlakem nebo dokonce i tvarem.

Materiál VBD IC4050 disponuje povlakem MTCVD, touto technologií je nanášen i povlak na destičkách firmy Pramet z materiálu M9340. Materiál IC4050 je taktéž vysoce odolný proti opotřebení, vhodný pro použití za nestabilních podmínek, například přerušovaný řez. Použití je uváděno pro obrábění legovaných ocelí, korozi-vzdorných ocelí a litin. Na obrázku 360 použité destičky OEMT 060405AER-76 z materiálu IC4050.



Obr. 14 VBD Iscar OEMT 060405AER-76.

Profil hlavního ostří jediného zkoušeného typu vyměnitelných břitových destiček firmy Iscar OEMT 060405AER-76, má ostří se zaoblením. Hodnota poloměru zaoblení je uvedena v příloze 1, a to 0,08 mm. Úhel sklonu čela pozitivní o velikosti $4^{\circ}30'$.



Obr. 15 profil hlavního ostří VBD Iscar OEMT 060405AER-76.

3.2.5 Volba řezných podmínek

Volba řezných podmínek proběhla na základě doporučení výrobců, pro stanovenou oblast obrábění. Dále se doporučené řezné podmínky udávané výrobcem liší dle geometrie, tvaru, velikosti a materiálu, ze kterého je vyměnitelná břitová destička vyrobena. V tabulce 10 jsou uvedené řezné podmínky pro frézování korozivzdorných ocelí pro námi vybraný sortiment firem Pramet Tools, Mitsubishi Materials a Iscar.

Tab. 10 Doporučené řezné podmínky řezné podmínky. [11, 12, 13]

Výrobce	označení	materiál	řezná rychlost [m/min]	max. hloubka řezu a_p [mm]	rozsah posuvu na zub f_z [mm]
MITSUBISHI	OEMX12T3ESR1	F7030	150–300	2,5	0,05 – 0,20
	OEMX12T3ETR1-JS	F620	150–300	2,5	0,05 – 0,20
	OEMX12T3EER1-JS	F7010	150–250	2,5	0,05 – 0,20
PRAMET	OEHT0604AESR-MM-P01	M9340	110–260	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P02	M9340	110–260	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P03	M9340	110–260	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P04	M9340	110–260	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P01	8240	110–180	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P02	8240	110–180	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P03	8240	110–180	4	0,08 – 0,25
	OEHT0604AESR-MM-P04	8240	110–180	4	0,08 – 0,25
ISCAR	OEMT 060405AER-76	IC4050	80–220	2,5	0,12 – 0,20

Na základě těchto doporučených řezných podmínek, byly navrhovány řezné podmínky jednotlivých zkoušek. U jednotlivých zkoušek byla vždy dodržována maximální hloubka řezu pro zachování možnosti využití všech osmi ostří. Drsnost byla měřena v rozsahu posuvu na zub 0,1 mm až 0,3 mm, což maximální hodnoty převyšuje, ale výsledky drsnosti povrchu obrobené plochy byly předpokládány lepší než při obrábění posuvem na zub, který je nižší než šířka negativně skloněné fazetky na čele.

3.3 Materiál obrobku

Při frézování byly použity tři různé materiály, dva z nich jsou zástupci materiálu řazených do skupiny M. Třetí materiál je uhlíková ocel ČSN 12 050.1, která byla využita pro měření řezných sil.

Prvním použitým materiálem byla austenitická korozivzdorná ocel ČSN 17349.4 (W. Nr. 1.4404), který má sloužit jako etalon při určování obrobitelnosti korozivzdorných ocelí. Tato ocel je nekalitelná, nemagnetická a má sklon ke zpevňování za studena. Materiál má dobrou odolnost proti mezikrystalické korozi, ta nehrozí ani při svařování. Materiál je relativně dobře obrobitelný a je vhodný k tváření za studena. Tato ocel nalézá využití i v agresivnějším například přímořském prostředí průmyslového typu.

Dalším použitým materiálem byl ČSN 17 240 (W. Nr. 1.4301). Tento materiál je opět nekalitelný, nemagnetický a má sklon ke zpevňování za studena. Jeho částečnou magnetičnost může způsobit zbytkový martenzit z výroby ocele nebo deformační martenzit, který vzniká při tváření austenitické struktury a zvyšuje pevnost této ocele. Martenzit lze samozřejmě odstranit žíháním. Tato ocel je dobře svařitelná, ale tepelně ovlivněná oblast je náchylná na mezikrystalickou korozi, z tohoto důvodu je zapotřebí další tepelná úprava po svaření. Jelikož je tato ocel korozivzdorná jen v běžných prostředích jako je voda, slabé kyseliny či běžná atmosféra, používá se tato ocel především v gastronomii, vodárnách, čističkách odpadních vod a pro venkovní stavby.

Poslední použitou ocelí byla ČSN 12 050.1 (W. Nr. 1.0503). Jedná se o konstrukční uhlíkovou nelegovanou ocel vhodnou pro zušlechťování. Obrobitelnost závisí na stavu oceli. V tomto případě doplňková číslice „1“ značí normalizační žíhání. Díky vysokému obsahu uhlíku je tato ocel povrchově kalitelná a to do vody, či oleje. Tato ocel má velký rozsah použití, používá se pro výrobu hřídelů, větších ozubených kol, šneků, ojnic, pístů, vřeten a mnoha dalších součástí.

Tab. 11 chemické složení použitých materiálů. [14]

označení ČSN (W. Nr.)		obsah prvků [hmot. %]								
		C	Cr	Cu	Mo	Mn	Ni	P	S	Si
12 050	min.	0,42	–	–	–	0,50	–	–	–	0,17
	max.	0,50	0,25	0,30	–	0,80	0,30	0,04	0,04	0,37
17 240	min.	–	17,00	–	–	–	9,00	–	–	–
	max.	0,07	20,00	–	–	2,00	11,50	0,045	0,03	1,00
17 349	min.	–	16,50	–	2,00	–	11,00	–	–	–
	max.	0,03	18,50	–	2,50	2,00	14,00	0,045	0,03	1,00

Tab. 12 mechanické vlastnosti použitých materiálů. [15]

označení ČSN (W. Nr.)	Pevnost v tahu R_m [MPa]	minimální mez pružnosti $R_{p0,2}$ [MPa]	minimální tažnost A_5 [%]	maximální tvrdost HB
17 240.4	500–700	190	45	215
17 349.4	530–680	240	40	215
12 050.1	min. 540	325	17	225

Před provedením jednotlivých zkoušek bylo provedeno kontrolní měření tvrdosti obráběného materiálu. Pro měření tvrdosti byl použit tvrdoměr QUUOTIP, který má při měření tvrdosti dle Brinella rozsah 80 – 650. Měření probíhalo ve třech místech obráběné plochy. Tedy přibližně 7 cm od levého okraje, uprostřed a 7 cm od pravého okraje, v druhém rozměru to bylo vždy uprostřed. Jednotlivé vzorky stejného druhu materiálu si svojí průměrnou tvrdostí odpovídaly. Tvrdost dle Brinella na různých místech vzorku byla v rozmezí ± 6 od průměrné hodnoty. Jelikož neměřené hodnoty nijak nevybočovaly z předpokládaných hodnot, nebyly tyto hodnoty podrobně zaznamenávány.

Tab. 13 Průměrné hodnoty naměřené tvrdosti materiálů obrobku.

materiál	průměrná tvrdost HB [-]
17 240.4	160
17 349.4	145



Obr. 16 měření tvrdosti povrchu materiálu 17 349.4

4 PROVEDENÍ A VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Společnost Pramet Tools, s. r. o. v oblasti frézování materiálů skupiny M začala před několika roky nabízet frézu využívající čtvercové vyměnitelné břitové destičky. Frézovací nástroje používající čtvercové nástroje jsou velice rozšířené. Obliba tohoto tvaru vyměnitelných břitových destiček spočívá především v jeho nízké pořizovací ceně. Cenu ovlivňuje fakt, že toto řešení nabízí takřka každá společnost zabývající se výrobou obráběcích nástrojů ze slinutých karbidů a také relativně nízké náročnosti výroby. Výsledkem je vysoká efektivnost nástroje, kterou zvyšují právě zmíněné náklady ostří.

Konkurence nabízí frézovací nástroje ještě s vyšší efektivností. Tyto frézovací nástroje využívají oktagonální či kruhové vyměnitelné břitové destičky. Ačkoliv jsou tyto břitové destičky dražší, disponují při správném použití dvounásobným počtem ostří, především při dodržení maximální hloubky záběru ostří. Pro zachování konkurenceschopnosti se tedy společnost Pramet Tools rozhodla doplnit svoje portfolio v oblasti frézování materiálů skupiny M, tedy korozivzdorných ocelí o frézovací nástroj využívající oktagonální vyměnitelné břitové destičky. Jelikož dodnes tato společnost frézovací nástroj s oktagonálními vyměnitelnými břitovými destičkami vhodnými pro frézování materiálů skupiny M nenabízela, jedná se tedy o zavedení zcela nového nástroje do výroby.

V rámci vývoje byla provedena analýza nástrojů konkurence. Na základě zkušeností a poznatků získaných na základě řešení konkurence byly navrženy čtyři různé geometrie vyměnitelných břitových destiček a dvě různé fréz. Vyměnitelné břitové destičky byly vyhotoveny ve dvou materiálech. Tyto materiály jsou charakteristické vysokou houževnatostí, ale využívají rozdílnou technologii nanesení povlaku.

Pro vyhodnocení funkčních vlastností a trvanlivosti navrhovaných prototypů byly provedeny zkoušky. Do těchto zkoušek byly pro srovnání konkurenceschopnosti zahrnuty i nástroje vytypované konkurencí. Mezi konkurenty nebyly zahrnuty společnosti spadající do holdingu Sandvik AB, do kterého patří i společnost Pramet Tools. Z tohoto důvodu byla vybrána mezi konkurenty společnost Mitsubishi Materials a Iscar.

Provedené zkoušky lze rozdělit do tří částí. Před provedením zkoušek byly změřeny skutečné parametry nástrojů. U frézy se především jednalo o maximální průměr frézy D_1 , průměr D_c , dále samozřejmě axiální a radiální házivost, axiální a radiální úhel nastavení a tvrdost frézy. Při měření vyměnitelných břitových destiček bylo naměřeno provedení každého použitého ostří, byla naměřena velikost zaoblení, jeho posunutí a případně šířka fazetky.

V první části zkoušek byla měřena trvanlivost ostří na etalonu korozivzdorných ocelí, čímž je ocel ČSN 17 349.4 (W. Nr. 1.4404). Trvanlivost byla měřena na všech variantách frézovacích nástrojů firmy Pramet Tools, provedení vyměnitelných břitových destiček z materiálu 8240, který využívá povlak nanesený metodou PVD. Materiál s povlakem PVD byl použit na základě rozhodnutí managementu, jelikož obchodní zástupci i zákazníci této firmy nástroje s povlakem PVD upřednostňují. Bohužel hodnoty naměřených trvanlivostí měly velký rozptyl, viz kapitola 4.1.1. Ve zkouškách fréz osazených vyměnitelnými břitovými destičkami s povlakem PVD nebylo pokračováno i z důvodu, že toto řešení není nabízeno ani ostatními výrobci obráběcích nástrojů ze slinutých karbidů.

V druhé části byly srovnávány nástroje Pramet Tools, Mitsubishi a Iscar. Nástroje Pramet Tools byly použity se stejnou geometrií jako v předchozí zkoušce, ale tentokrát byly vyměnitelné břitové destičky z materiálu M9340 s povlakem CVD. Především z důvodu

možnosti porovnání s konkurencí, například přední výrobce Mitsubishi Material nabízí pro frézování korozivzdorných ocelí břitovými destičkami osmihranného tvaru, pouze břitové destičky z materiálů s povlakem CVD. Výrobce Iscar nabízí pouze jedno řešení s povlakem PVD a několik s povlakem CVD. V této části byla měřena trvanlivost ostří jednotlivých vyměnitelných břitových destiček na materiálu 17 240.4. Dále byly provedeny funkční zkoušky vyhodnocující drsnost povrchu obrobené plochy, utváření třísky a zatížení vřetene, to vše na materiálu 17 349.4. Rozsah zkoušek byl ovlivněn průběžnými výsledky zkoušek, kdy z osmi variant nástrojů Pramet Tools byly plně hodnoceny jen dvě varianty. Na frézovacích nástrojích, u kterých nebylo uvažováno o seriové produkci, proběhlo alespoň kontrolní měření, pro potvrzení předpokladů.

V poslední části bylo provedeno měření řezných sil. Měření bylo provedeno pouze na dvou vybraných nástrojích Pramet Tools, třech frézovacích nástrojích Mitsubishi Materials a jednom nástroji od firmy Iscar.

4.1 Měření trvanlivosti

Pro určení reálné efektivnosti obrábění je zapotřebí znát skutečnou trvanlivost ostří popřípadě přepočítanou hodnotu na živostnost nástroje. Zjištění reálné hodnoty trvanlivosti je cílem těchto zkoušek. Pro objektivnost je nutné dodržet konstantní podmínky, tedy od konstantních řezných podmínek, které musí být v doporučeném pásmu od výrobce pro všechny zkoušené nástroje, přes stejný materiál obrobku až po použití stejného stroje pro vykonání zkoušky.

Měření trvanlivosti proběhlo na ve zkušební firmě Pramet Tools na stroji MCV 1270 Power od výrobce Kovošvit MAS. Při měření bylo měřeno opotřebení na hřbetu nástroje, kritérium maximálního opotřebení bylo stanoveno na $VB = 0,3 \text{ mm}$. Zkoušky trvanlivosti proběhly na dvou různých materiálech a lze je rozdělit do tří částí.

V první části zkoušek byla měřena trvanlivost na materiálu ČSN 17 349.4. Na tomto materiálu byla naměřena trvanlivost prototypů vyměnitelných břitových destiček Pramet Tools, jednalo se tedy o dvě frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01 a 63A04R-S45OE06Z-C-P02 s různou geometrií v kombinaci s vyměnitelnými břitovými destičkami OEHT0604AESR-MM čtyřech různých geometriích (P01, P02, P03 a P04), vyhotovené v materiálu 8240 s povlakem PVD. Tyto nástroje jsou podrobně popsány v kapitole 3.2.2.

Na základě první zkoušky trvanlivosti, naměřené drsnosti a utváření třísky bylo rozhodnuto o pokračování testů s frézou 63A04R-S45OE06Z-C-P01, při použití vyměnitelných destiček OEHT0604AESR-MM-P01 a OEHT0604AESR-MM-P03. Dále bylo rozhodnuto o změně materiálu vyměnitelných břitových destiček za M9340, který má podobnou charakteristiku jako předchozí, ale využívá povlak nanášený metodou CVD. V této části proběhlo i srovnání s konkurencí, srovnávané nástroje firem Mitsubishi a Iscar jsou popsány v kapitolách 4.2.3 a 4.2.4. Tato druhá část měření trvanlivosti byla provedena na materiálu ČSN 17 240.4.

Jelikož není možné srovnávat trvanlivost naměřenou na různých materiálech při různých řezných podmínkách. Byla provedena třetí a poslední část zkoušek, která byla zaměřena na ověření správnosti našich rozhodnutí a rozhodnutí ze strany managementu. Byla zde naměřena trvanlivost nástrojů firmy Pramet Tools na materiálu 17 240.4, které byly vyřazeny pro srovnání s konkurencí po první části zkoušek. Tedy jednalo se pouze o měření trvanlivosti zbylých geometrií vyměnitelných břitových destiček, v provedení dvou materiálů upnutých na frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01.

4.1.1 Trvanlivost nástrojů Pramet Tools při obrábění oceli ČSN 17 349.4

Trvanlivost nástrojů na materiálu ČSN 17 349.4 byla měřena pouze u prototypů značky Pramet Tools a sloužila pouze pro jejich interní srovnání. Charakteristika, chemické složení a mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou popsány v kapitole „3.3 Materiál obrobku“. Měření trvanlivosti proběhlo, jak již bylo zmiňováno, na stroji MCV 1270 Power od výrobce Kovošvit MAS, jehož parametry jsou popsány v kapitole „3.1 Obráběcí stroje“. Pro tyto zkoušky trvanlivosti byly použity řezné podmínky, viz tabulka 14.

Tab. 14 řezné podmínky pro zkoušku trvanlivosti na ČSN 17 349.4.

parametr	jednotka	hodnota
řezná rychlost v_c	[m/min]	180
otáčky n	[-]	909
posuv na zub f_z	[mm]	0,15
posuv f	[mm/min]	136
hloubka řezu a_p	[mm]	2,5
šířka frézované plochy a_e	[mm]	50

Při měření nebyla použita žádná procesní kapalina. Délka obráběného dílce byla 300 mm a fréza byla osazena pouze jednou vyměnitelnou břitovou destičkou. Při posuvu 0,15 mm na zub a obsazení pouze jednou vyměnitelnou břitovou destičkou je posuvová rychlost přibližně 136 mm/min. Z tohoto lze vypočítat dobu záběru při jednom průjezdu, která byla 4.4 minuty, což se projevilo i u měření opotřebení. Hodnoty opotřebení byly měřeny vždy po uskutečnění celého průjezdu.

V tabulce 15 jsou výsledky měření trvanlivosti vyměnitelných břitových destiček firmy Pramet Tools při upnutí ve fréze 63A04R-S45OE06Z-C-P01. Pro srovnání je v posledním sloupci vypočítaná relativní řezivost, která je pro celou kapitolu 4.1.1 vztažena na průměrnou trvanlivost VBD OEHT 0604AESR-MM-P01 při upnutí do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01.

Tab. 15 trvanlivost VBD (fréza 63A04R-S45OE06Z-C-P01).

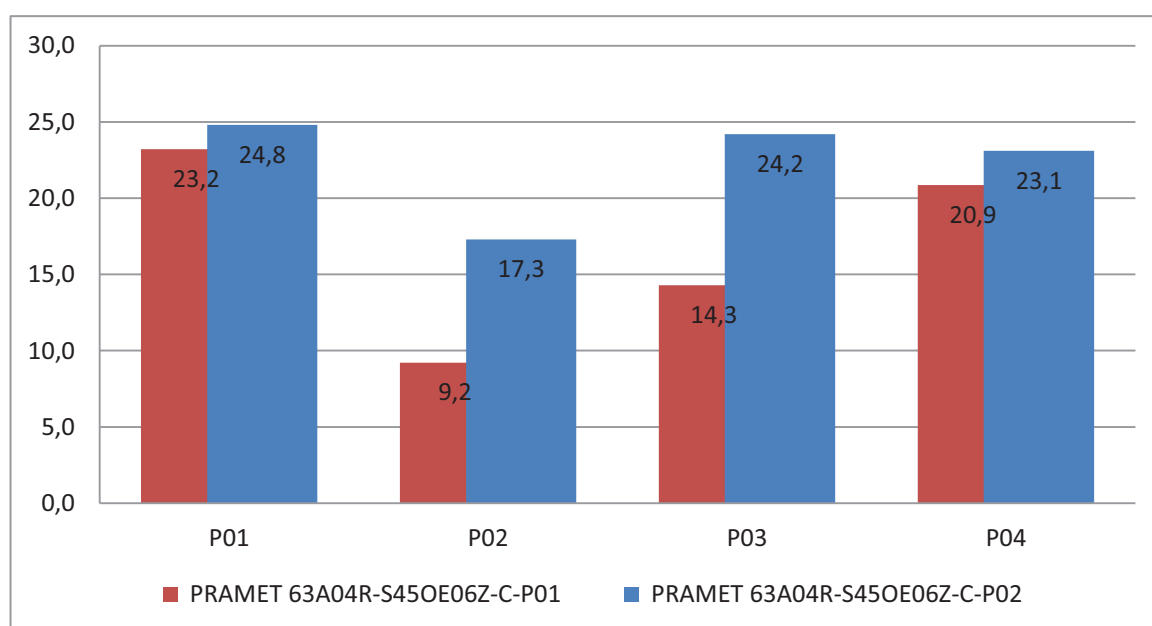
výrobce nástroje	fréza	PRAMET 63A04R-S45OE06Z-C-P01				
	VBD	materiál	vzorek	trvanlivost T [min]	průměrná trvanlivost [min]	poměrná řezivost [%]
Pramet	OEHT 0604AESR-MM-P01	8240	A3	30,4	23,2	100
			A4	16		
Pramet	OEHT 0604AESR-MM-P02	8240	B5	6,6	9,2	40
			B4	11,8		
Pramet	OEHT 0604AESR-MM-P03	8240	C2	11	14,3	62
			C3	17,6		
Pramet	OEHT 0604AESR-MM-P04	8240	D2	21,6	20,9	90
			D9	20,1		

V následující tabulce 16 je měřena trvanlivost pro stejné vyměnitelné břitové destičky jako v prvním případě, tentokrát upnuty do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P02. Ve všech případech bylo měření ukončeno z důvodu vyštípnutého hlavního ostří, ve většině případů došlo ke křehkému lomu na ostří ve vzdálenosti hloubky záběru ostří od špičky nástroje. Podrobnější rozbor v analýze průběhu opotřebení, které následuje za vyhodnocením trvanlivosti.

Tab. 16 trvanlivost VBD (fréza 63A04R-S45OE06Z-C-P02).

výrobce nástroje	fréza	PRAMET 63A04R-S45OE06Z-C-P02				
	VBD	materiál	vzorek	trvanlivost T [min]	průměrná trvanlivost [min]	poměrná řezivost [%]
Pramet	OEHT 0604AESR-MM-P01	8240	A7	16,9	24,8	107
			A9	32,7		
Pramet	OEHT 0604AESR-MM-P02	8240	B0	17	17,3	75
			B8	17,6		
Pramet	OEHT 0604AESR-MM-P03	8240	C6	30,8	24,2	104
			C7	17,6		
Pramet	OEHT 0604AESR-MM-P04	8240	D0	17,6	23,1	100
			D3	28,6		

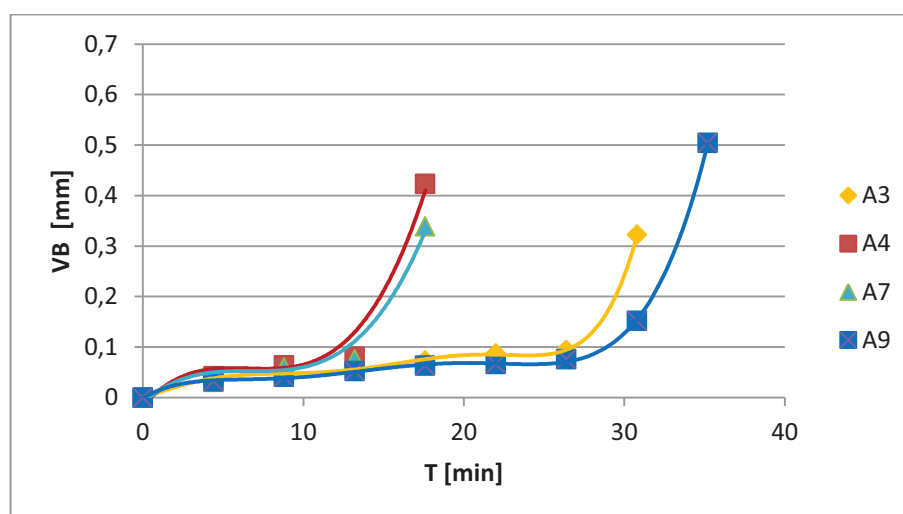
Pokud srovnáme jednotlivé vyměnitelné břitové destičky, zjistíme, že v obou případech dosahuje nejnižší trvanlivosti OEHT 0604AESR-MM-P02, na opačném konci jsou vyměnitelné břitové destičky OEHT 0604AESR-MM-P01 a OEHT0604AESR-MM-P04, ačkoliv se zde potýkáme s vysokým rozptylem v trvanlivosti jednotlivých vzorků. Z hlediska vyhodnocování vlivu použité frézy na trvanlivost vyměnitelné břitové destičky je vhodnější použití frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P02, tedy nástroj s negativním úhlem nastavení lůžka. Na obrázku 17 je provedeno grafické porovnání trvanlivosti jednotlivých vyměnitelných břitových destiček s barevným odlišením dle použité frézy.



Obr. 17 porovnání trvanlivosti VBD při upnutí ve dvou různých frézách.

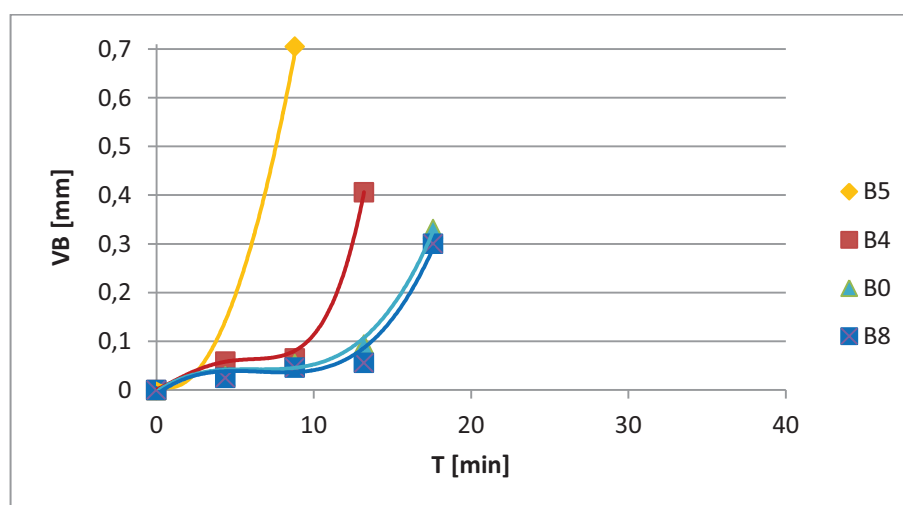
V průběhu měření trvanlivosti bylo měřeno opotřebení hlavního hřbetu vyměnitelné břitové destičky. Jak již bylo zmíněno výše, měření opotřebení proběhlo vždy po dokončení průjezdu materiálem obrobku, který trval přibližně 4 minuty a 24 sekund. Tabulky hodnot těchto opotřebení jsou v příloze 3.

Na následujících obrázcích je zobrazen průběh růstu opotřebení na hlavním hřbetu vyměnitelné břitové destičky. Vzorky jsou značeny totožně jako v tabulkách 15 a 16, na obrázku je vyobrazen průběh opotřebení vždy jednoho typu vyměnitelných břitových destiček, kde dvě měření proběhli při upnutí ve fréze 63A04R-S45OE06Z-C-P01 a další dvě ve 63A04R-S45OE06Z-C-P02. Například na obrázku 18 byly vzorky A3 a A4 upnuty ve fréze 63A04R-S45OE06Z-C-P01 dohledatelné v tabulce 456. Zbylé dva vzorky A7 a A8 byly upnuty ve fréze 63A04R-S45OE06Z-C-P02 což je uvedeno v tabulce 16. Přičemž vzorky A3, A4, A7 a A9 jsou OEHT 0604AESR-MM-P01.



Obr. 18 graf průběhu opotřebení VBD OEHT 0604AESR-MM-P01.

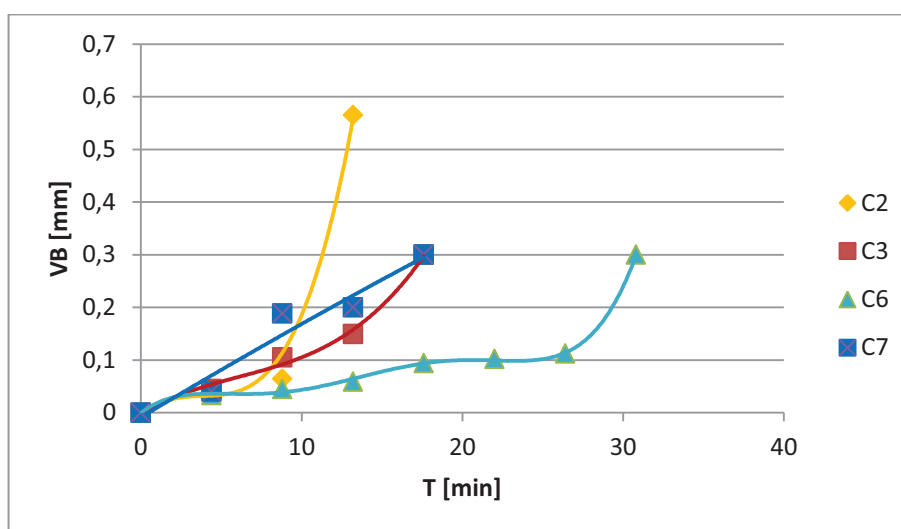
Jak je z průběhu opotřebení na obrázku 18 i 19 zřejmé, dochází ke skokovému nárůstu opotřebení vždy po uplynutí jiné doby obrábění, což se odráží i na trvanlivosti, která má velký rozptyl. Tento jev pozorujeme u vyměnitelné břitové destičky OEHT 0604AESR-MM-P01 u obou variant fréz.



Obr. 19 graf průběhu opotřebení VBD OEHT 0604AESR-MM-P02.

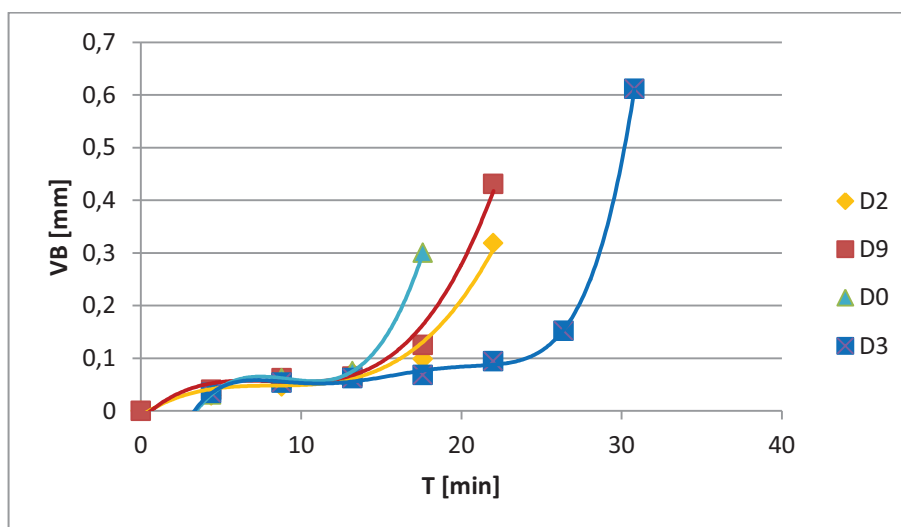
Při analýze opotřebení vyměnitelné břitové destičky OEHT 0604AESR-MM-P02 zjistíme, že trvanlivost vzorků se pohybuje v rozmezí 5 minut až necelých 20 minut, což je znatelně méně než u ostatních geometrií vyměnitelných břitových destiček. Lze zde pozitivně hodnotit vzorky B0 a B8, které byly upnuty do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P02 a dosáhly trvanlivosti 17 a 17,6 minut. Znamená to tedy, že na rozdíl od ostatních trvanlivost měla minimální rozptýl. Podobně dopadly i vyměnitelné břitové destičky OEHT 0604AESR-MM-P04 upnuty ve fréze 63A04R-S45OE06Z-C-P01 s trvanlivostí 21,6 a 20,1 minut.

Kromě problému s vysokým rozptylem trvanlivosti jednotlivých vzorků, docházelo takřka u každého vzorku k ukončení testu díky vyštípnutí hlavního ostří, čímž vzniklo opotřebení ha hřbetu vyšší než 0,3 mm. Jak je z grafů zřejmé velikost opotřebení po vyštípnutí hlavního ostří se skokově zvýšila až o 0,5 mm.



Obr. 20 graf průběhu opotřebení VBD OEHT 0604AESR-MM-P03.

Jak je tedy z jednotlivých grafů průběhu opotřebení zřejmé, takřka ve všech případech došlo při překročení velikosti opotřebení hřbetu nad 0,1 mm k vyštípnutí hlavního ostří. Déle lze konstatovat, že k tomuto vyštípnutí hlavního ostří došlo na hlavním ostří přibližně ve vzdálenosti šířky záběru ostří od špičky nástroje.



Obr. 21 graf průběhu opotřebení VBD OEHT 0604AESR-MM-P04.

Naměřené hodnoty opotřebení po jednotlivých průjezdech nástroje materiálem obrobku je v příloze 3. V této příloze je zobrazen průběh růstu opotřebení, kde lze vidět právě zmiňované vyštípnutí hlavního ostří. Opotřebení bylo foceno po každém průjezdu, kdy byl první průjezd vynechán z důvodu takřka neznatelného opotřebení. Zaznamenáno bylo opotřebení při pohledu na hlavní hřbet nástroje a jeho čelo.

4.1.2 Trvanlivost nástrojů při obrábění oceli ČSN 17 240.4

Po nepříliš vydařených zkouškách trvanlivosti na materiálu 17 349.4, byly provedeny další zkoušky trvanlivosti, tentokrát na materiálu 17 240.4, popsáném v kapitole „3.3 Materiál obrobku“. Zkoušky na tomto materiálu byly rozděleny na dvě části.

V první části byly na tomto materiálu zkoušeny vytypované prototypy nástrojů firmy Pramet Tools a jim odpovídající konkurenční nástroje firem Mitsubishi Materials a Iscar. Konkrétně se jednalo u firmy Pramet Tools o vyměnitelné břitové destičky OEHT 0604AESR-P01 a OEHT 0604AESR-P03 z materiálu M9340 s CVD povlakem upnuté do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01. Z nástrojů konkurence byly pro měření trvanlivosti na tomto materiálu použity všechny nástroje firmy Mitsubishi Materials popsány v kapitole 3.2.3 a jediný použitý nástroj firmy Iscar popsáný v kapitole 3.2.4.

V druhé části byla kontrolně měřena trvanlivost všech variant vyměnitelných břitových destiček firmy Pramet Tools z materiálu M9340 upnutých do obou variant fréz. Jelikož se jednalo pouze o kontrolu správnosti rozhodnutí při výběru nástrojů porovnávaných s konkurenčními.

Zkoušky byly prováděny na totožném stroji jako předchozí, tedy na stroji MCV 1270 Power od výrobce Kovošvit MAS, jehož parametry jsou popsány v kapitole „4.1 Obráběcí stroje“. Pro tuto zkoušku byly upraveny řezné podmínky, které splňují doporučení pro všechny zkoušené nástroje. Tyto řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 17.

Tab. 17 řezné podmínky pro zkoušku trvanlivosti na ČSN 17 240.4.

parametr	jednotka	hodnota
řezná rychlost v_c	[m/min]	140
posuv na zub f_z	[mm]	0,15
hloubka řezu a_p	[mm]	2,5
šířka frézované plochy a_e	[mm]	50

Při provádění zkoušek nebyla použita procesní kapalina. Měření probíhalo pouze s jednou upnutou vyměnitelnou břitovou destičkou na nástroji. Frézovaný obrobek šířky 50 mm byl dlouhý 300 mm a měření opotřebení probíhalo vždy po dvou průjezdech nástroje. Jelikož fréza Mitsubishi Materials má jiný průměr než udává pro dané označení norma ISO, byly při provádění zkoušek nastaveny pro frézu Mitsubishi jiné otáčky. Těmto otáčkám byla přizpůsobena i posuvová rychlost, tak aby odpovídala posuvu na zub $f_z = 0,15$ mm.

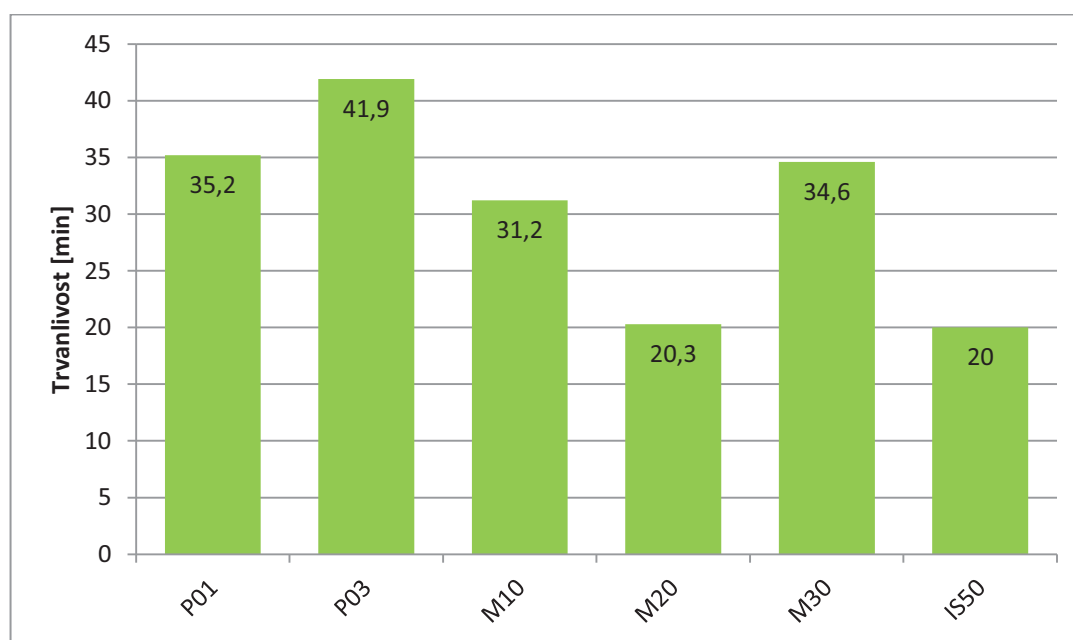
Výsledky zkoušky trvanlivosti jsou pro jednotlivé nástroje uvedeny v tabulce 18. Jak je zřejmé řezivost byla opět vztažena k nástroji Pramet Tools s vyměnitelnou břitovou destičkou OEHT 0604AESR-MM-P01. Výsledky nelze přímo porovnávat s trvanlivostí měřenou na materiálu 17 349.4, jelikož se jedná o rozdílný materiál a zkoušky probíhaly i za jiných řezných podmínek.

Tab. 18 trvanlivost VBD při obrábění materiálu 17 240.4.

Výrobce	VBD	označení (obr. 22)	materiál	vzorek	trvanlivost T [min]	ϕT [min]	poměrná řezivost [%]
Pramet Tools	OEHT 0604AESR- MM-P01	P01	M9340	A2	38,8	35,2	100
				A5	31,6		
Pramet Tools	OEHT 0604AESR- MM-P03	P03	M9340	C2	39,9	41,9	119
				C8	43,8		
Mitsubishi Materials	OEMX 12T3 EER1 - JS	M10	F7010	G7	33	31,2	89
				G9	29,4		
Mitsubishi Materials	OEMX 12T3 ETR1 - JS	M20	F620	F3	21,6	20,3	58
				F4	19		
Mitsubishi Materials	OEMX 12T3 ESR1	M30	F7030	E7	35,6	34,6	98
				E6	33,6		
Iscar	OEMT 060405 AER - 76	IS50	IC4050	B2	17,1	20,0	57
				B9	22,8		

Jak je z tabulky naměřených hodnot trvanlivosti a grafu na obrázku 22 patrné, nástroje nejlépe dopadl nástroj firmy Pramet Tools, vyměnitelná břitová destička OEHT 0604AESR-MM-P01, která byla upnuta do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01. Přibližně o sedm minut nižší trvanlivosti dosáhla druhá navrhovaná vyměnitelná břitová destička firmy Pramet Tools upnuta v totožné fréze, obdobnou trvanlivostí disponuje i nástroj OEMX 12T3ESR1. O necelých jedenáct minut nižší trvanlivost vykázal další z nástrojů Mitsubishi Materials OEMX 12T3EER1-JS.

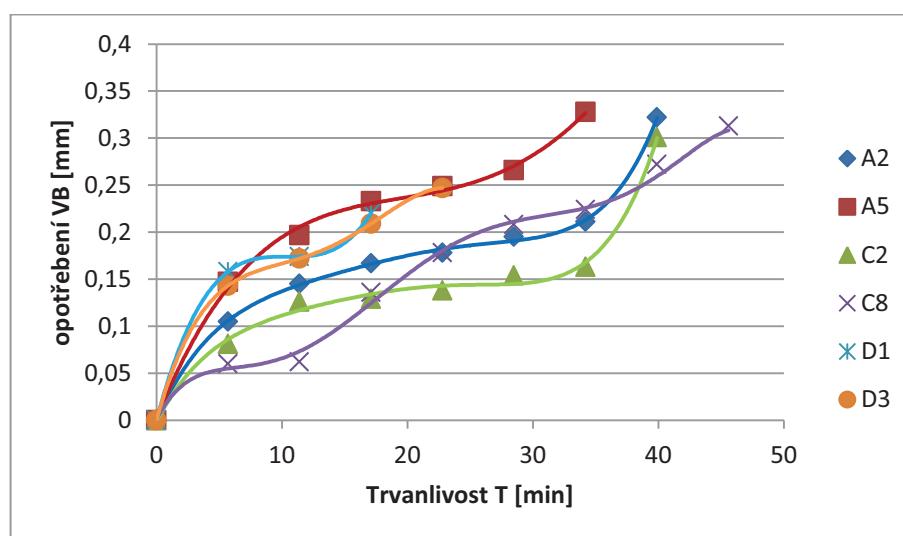
Takřka poloviční trvanlivost oproti nástroji s nejvyšší naměřenou trvanlivostí je vyměnitelná břitová destička Mitsubishi Materials OEMX 12T3ETR1-JS, která je paradoxně vyráběna z materiálu, který se řadí u této firmy k novinkám. Obdobně dopadl i nástroj firmy Iscar.



Obr. 22 graf trvanlivosti VBD při obrábění materiálu 17 240.4, označení viz tab. 18.

V proběhu zkoušek trvanlivosti jednotlivých nástrojů probíhalo měření opotřebení na hlavní a vedlejší hřbetu břitové destičky, jelikož směrodatné bylo pro ukončení zkoušky takřka vždy opotřebení na hlavním hřbetě břitové destičky, je zde uvedenou opotřebení pouze hřbetu hlavního. Označení vzorků v textu a na obrázcích 23 a 24 odpovídá vyměnitelným břitovým destičkám v tabulce 18.

Ke zmíněnému opotřebení vedlejšího hřbetu došlo o vzorku D3, tedy nástroje firmy Iscar, kde bylo naměřeno opotřebení na hřbetu v oblasti špičky břitové destičky $VB_c = 0,369$ mm, dále na tomto vzorku došlo k drolení a vyštípnutí hlavního ostří. Na druhém vzorku D1 tohoto výrobce došlo k vyštípnutí špičky nástroje. Tyto deformace se odrazili i na nízké trvanlivosti a rychlému růstu opotřebení, který byl již při prvním měření, po necelých šesti minutách, přibližně 0,15 mm u obou vzorků. Průběh opotřebení vzorků D1 a D3 je na obrázku 23.

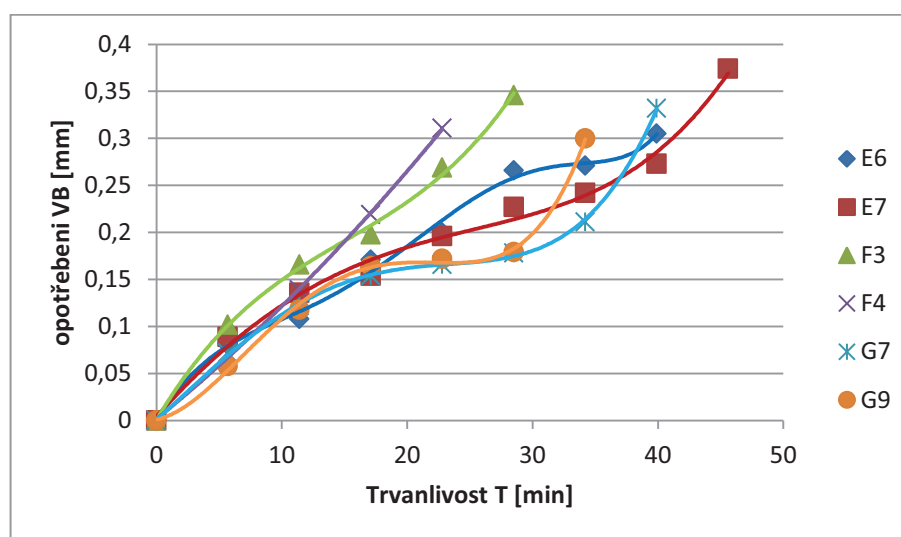


Obr. 23 průběh růstu opotřebení nástrojů Pramet Tools a Iscar.

Na obrázku 23 jsou dále vyobrazeny i průběhy opotřebení vyměnitelných břitových destiček Pramet Tools. Jedná se tedy o vzorky A2, A5, C2 a C8. Tyto vzorky měli trvanlivost vyšší než 30 minut a oproti předchozímu měření trvanlivosti nedocházelo k velkému rozptylu výsledných trvanlivostí jednotlivých vzorků stejného typu vyměnitelných břitových destiček. Tento fakt souvisí i se skutečností, že při tomto měření nedocházelo k vyštipování hlavního ostří při překročení opotřebení $VB = 0,1$ mm jako u měření předchozího.

Na následujícím obrázku 24 jsou vyobrazeny průběhy opotřebení vyměnitelných břitových destiček firmy Mitsubishi Materials. Vzorky E6, E7, G7 a G9 vykazují obdobnou trvanlivost jako nástroje firmy Pramet Tools, rozptyl trvanlivostí jednotlivých druhů vyměnitelných břitových destiček nepřesahuje 15 %. Za zmínku stojí vzorek E6, který má průběh opotřebení takřka ideálně lineární. Druhý vzorek stejného nástroje E7, vykazuje také takřka lineární závislost.

Vzorky A2, A5, C2 a E7 jsou ukázkovým příkladem, kde lze určit tři oblasti opotřebení, o kterých pojednává literatura. První oblastí je oblast zrychleného záběhového opotřebení, na vzorku C2 viditelná přibližně desáté minuty trvanlivosti břitu. Následuje oblast lineárního opotřebení konstantní intenzitou, přibližně do 33. minuty průběhu zkoušky. Následuje poslední oblast zrychleného nadměrného opotřebení charakteristická vysokou strmostí, na vzorku C2 následuje po 33. Minutě trvanlivosti.



Obr. 24 průběh růstu opotřebení nástrojů Mitsubishi Materials.

Tabulky s hodnotami opotřebení, měřených vždy po zmíněných dvou průjezdech materiálem obrobku pro jednotlivé vzorky jsou v příloze 4. V příloze je vizuálně zaznamenán růst opotřebení u jednotlivých vzorků, jednotlivé fotografie byly pořizovány při měření opotřebení.

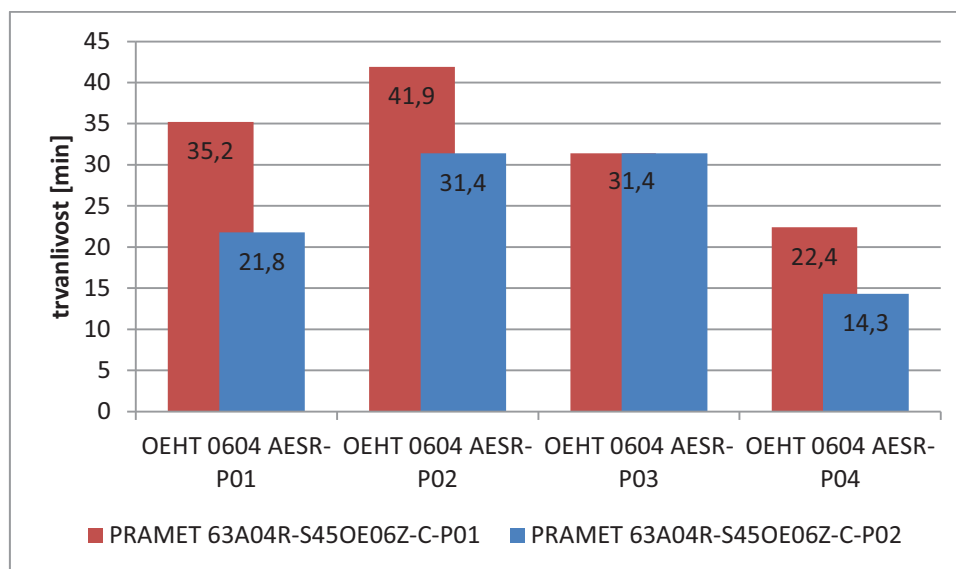
V druhé části byla měřena trvanlivost opět u nástrojů firmy Pramet Tools, tentokrát se jednalo o kontrolní měření geometrií, u kterých byly předpokládány horší funkční vlastnosti než u nástrojů zkoušených v předchozí části. Toto kontrolní měření proběhlo vždy jen na jednom vzorku vyměnitelné břitové destičky. Řezné podmínky a celkový průběh zkoušek byl totožný s ostatními zkouškami trvanlivost na materiálu 17 240.4. Pro srovnání je uvedená řezivost vztažena ke stejnému nástroji jako v tabulce 18, tedy vyměnitelné břitové destičce OEHT 0604AESR-MM-P01 upnuté v 63A04R-S45OE06Z-C-P01.

Výsledky zkoušky trvanlivosti jsou uvedeny v tabulce 19, jak je z této tabulky patrné ani jeden ze vzorků nedosáhl vyšší řezivosti, než vzorek, ke kterému je tato řezivost vztažena. Lze tedy říci, že pro porovnání s konkurencí byly vybráni zástupci s nejvyšší trvanlivostí z možných variant zkoušených nástrojů.

Tab. 19 trvanlivost VBD při obrábění materiálu 17 240.4.

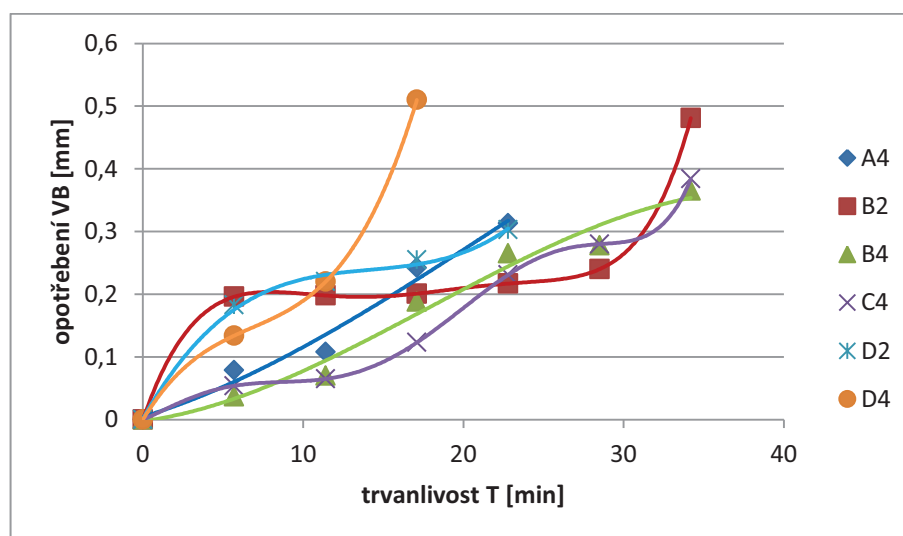
Fréza	VBD	materiál	vzorek	trvanlivost T [min]	poměrná řezivost [%]
63A04R-S45OE06Z-C-P01	OEHT 0604AESR-MM-P02	M9340	B2	31,4	89
	OEHT 0604AESR-MM-P04	M9340	D2	22,4	64
63A04R-S45OE06Z-C-P02	OEHT 0604AESR-MM-P01	M9340	A4	21,8	62
	OEHT 0604AESR-MM-P02	M9340	B4	31,4	89
	OEHT 0604AESR-MM-P03	M9340	C4	31,4	89
	OEHT 0604AESR-MM-P04	M9340	D4	14,3	41

Pokud je srovnávána trvanlivost stejné geometrie vyměnitelných břitových destiček při upnutí do jiné frézy, viz obrázek 25, dostáváme u geometrie OEHT 0604AESR-MM-P01 při upnutí do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P02 trvanlivost přibližně o 14 minut nižší než při upnutí do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01. Podobný rozdíl v trvanlivosti je i u druhé vybrané geometrie OEHT 0604AESR-MM-P02 kde je trvanlivost nižší o necelých 11 minut. Rozdílná trvanlivost byla naměřena i u břitových OEHT 0604AESR-MM-P04, kde se hodnoty trvanlivosti liší o 8 minut, avšak byly výrazně nižší než u ostatních zkoušených břitových destiček. Rozdílná trvanlivost nebyla naměřena pouze u břitových destiček OEHT 0604AESR-MM-P03 u těchto vyměnitelných břitových destiček byla naměřená trvanlivost totožná.



Obr. 25 porovnání trvanlivosti VBD při upnutí do rozdílných fréz.

Průběh opotřebení jednotlivých vzorků je uveden na obrázku 26. Pokud rozdělíme vzorky dle použité frézy, zjistíme, že vyměnitelné břitové destičky upnuté do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01, B2 a D2, byly značně opotřebeny během prvních minut zkoušky. Jedná se tedy o oblast zrychleného záběhového opotřebení. Další průběh opotřebení byl u každého vzorku rozdílný.



Obr. 26 průběh růstu opotřebení jednotlivých vzorků Pramet Tools.

4.2 Drsnost povrchu obrobené plochy

Při konstruování součástí je předpokládáno, že při obrábění bude dosaženo předepsaného tvaru, rozměru a kvality povrchu. Kvalitu povrchu ovlivnitelnou obráběním lze hodnotit z hlediska mechanických vlastností povrchové vrstvy, kdy lze hodnotit zpevnění, velikost a charakter zbytkových napětí a tvrdost této vrstvy. Dále lze kvalitu povrchu hodnotit dle dosažené geometrie povrchu, kde lze sledovat různé parametry drsnosti povrchu. Drsnost povrchu je jednou z nejčastěji požadovaných parametrů kvality povrchu součástí. Požadavek na povrch s nízkou drsností lze předpokládat především na plochách stykových (funkčních), kde tato drsnost zpravidla bývá předepsána. Pokud nejsou plochy funkční, tzv. volné plochy, nebývá zde předepsána drsnost každé plochy, ale je předpokládáno na těchto plochách docílení povrchu dle specifikace uvedené na výkrese.

Při měření struktury povrchu je nejčastěji určována maximální úchylka R_z a průměrná aritmetická úchylka R_a . Při provádění měření pro zjištění reálných vlastností bylo provedeno měření, při kterém byla zaznamenávána průměrná aritmetická úchylka R_a , základní délka vyhodnocování byla 15 mm. Drsnost povrchu byla samozřejmě měřena kolmo k trajektorii nástroje. Měření probíhalo pro různé posuvy, jednalo se o posuvy na zub odstupňovány po 0,05 mm a to od 0,1 mm až do 0,3 mm. Bylo tedy naměřeno pět hodnot drsnosti povrchu pro každý nástroj. Měření probíhalo za totožných podmínek pro všechny nástroje, jediným měněným parametrem byl již zmiňovaný posuv. Pro provedení zkoušek jsme využili opět zkušebnu firmy Pramet Tools, kdy byla zkouška provedena na stroji MCV 1270 Power, MAS Kovosvit. Zkouška byla provedena na obrobku o rozměrech 300 x 100 – 200 mm z materiálu 17 349.4. Při zkoušce nebyla použita procesní kapalina. Řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 20.

Tab. 20 Řezné podmínky pro měření drsnosti povrchu.

parametr	jednotka	hodnota
řezná rychlost v_c	[m/min]	160
posuv na zub f_z	[mm]	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30
šířka záběru ostří a_p	[mm]	1,5
šířka frézované plochy a_e	[mm]	50

Hodnota drsnosti povrchu R_a může být určena taktéž teoreticky za předpokladu, že známe poloměr zaoblení špičky vyměnitelné břitové destičky r_e a posuv nástroje f . Tento vztah lze použít pouze pro přibližné určení průměrné aritmetické úchylky. Lze říci, že pomocí tohoto vztahu lze lépe určit drsnost pro soustružení, jelikož při frézování dochází ke změně průřezu třísky, házení frézy a také je ostří opatřeno hladicí ploškou obdobně jako nástroje pro soustružení s označením wiper. Pro výpočet použijeme vzorec 4, jehož výsledek dosadíme do vzorce 5 pro průměrnou aritmetickou úchylku. Hodnoty jsou dosazovány v milimetrech, výsledek drsnosti je v mikrometrech. Hodnoty zaoblení špičky nástroje jsou rozdílné dle výrobce břitové destičky. Vyměnitelné břitové destičky Iscar mají zaoblení špičky $r_e = 0,5$ mm, břitové destičky Pramet Tools mají jednotné $r_e = 0,8$ mm a zaoblení špičky břitových destiček Mitsubishi je $r_e = 1$ mm.

$$\alpha_A = \arccos \left[\frac{r_\varepsilon}{f} \left(\arcsin \frac{f}{r_\varepsilon} + \frac{d}{4 \cdot r_\varepsilon^2} \cdot \sqrt{4 \cdot r_\varepsilon^2 - f^2} \right) \right] \quad (4)$$

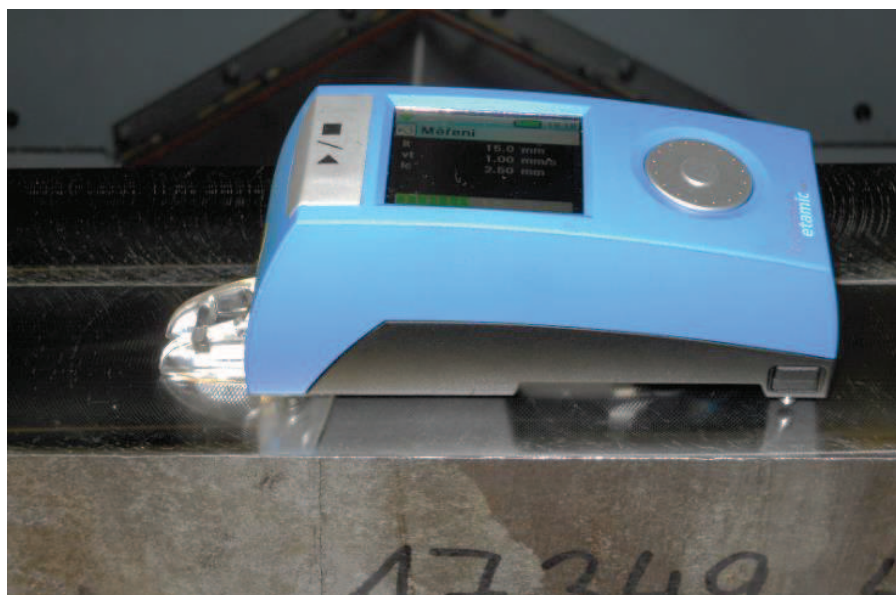
$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot r_\varepsilon^2 \cdot (2 \cdot \alpha_A - \sin 2 \cdot \alpha_A)}{f} \quad (5)$$

Tab. 21 teoretická průměrná aritmetická úchylka profilu Ra [μm].

r_ε [mm]	f_z [mm]				
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
0,5	0,643	1,45	2,587	4,06	5,881
0,8	0,401	0,904	1,609	2,518	3,634
1	0,321	0,723	1,286	2,011	2,9

Z tabulky 21 je zřejmé, že průměrná aritmetická úchylka profilu je závislá na velikosti posuvu na zub a na zaoblení špičky vyměnitelné břitové destičky. Na základě teorie lze konstatovat, že se zvyšující se hodnotou posuvu by měla být naměřena větší průměrná aritmetická úchylka povrchu. V porovnání nástrojů by měli dosahovat lepších hodnot nástroje s větším zaoblením špičky vyměnitelné břitové destičky, i když v praxi nesmíme zapomenout radiální a axiální házivost frézy.

Měření drsnosti povrchu bylo prováděno mobilním drsnoměrem Hommel – Etamic W5, což je drsnoměr třídy přesnosti 1 (± 5 %), podle DIN 4772. Maximální délka měřeného úseku 17,5 mm, při měření byla vyhodnocovací délka 15 mm, viz výše.

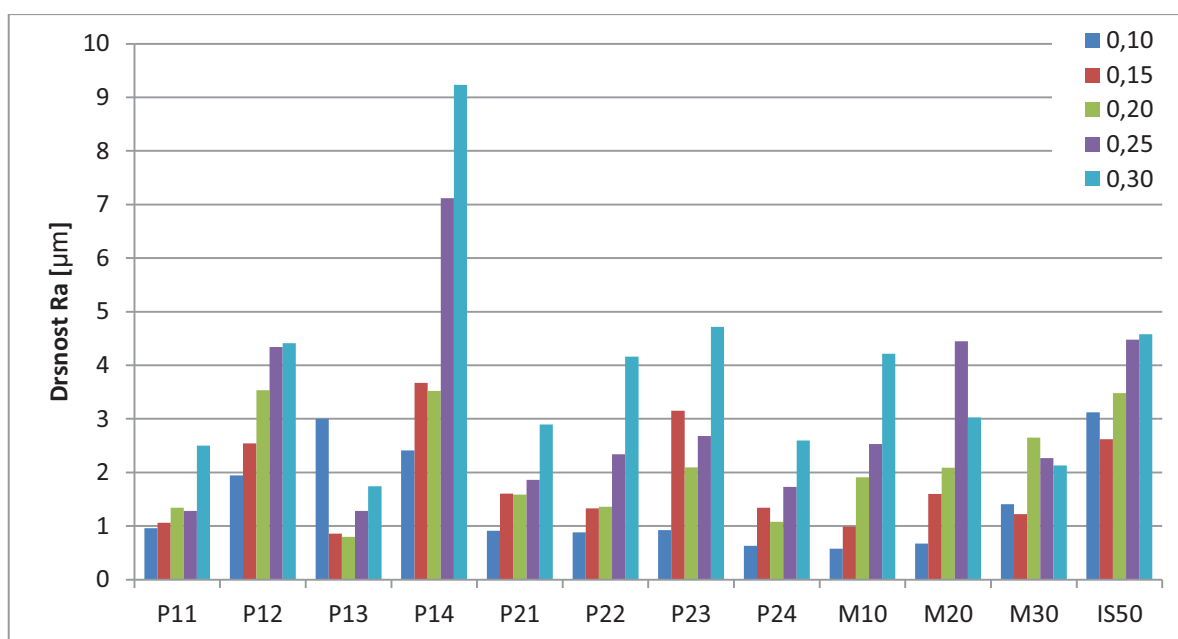


Obr. 27 měření drsnosti drsnoměrem Hommel – Etamic W5.

Provedením zkoušky bylo zjištěno, že hodnoty teoretické a skutečně naměřené jsou v některých případech takřka shodné. V mnoha případech bylo při zkoušce dosaženo vyšší kvality povrchu, než bylo předpokládáno na základě provedeného výpočtu. Je však nutné podotknout, že u jednotlivých posuvů docházelo k velkému rozptylu hodnot průměrné aritmetické úchylky profilu dle použitého nástroje. Například u posuvu na zub 0,1 mm se u většiny nástrojů pohybovaly hodnoty Ra v rozmezí 0,5 μm až 0,9 μm, ale nástroj firmy Pramet Tools označený v obr. 28 jako P14, či nástroj Iscar označený tamtéž jako IS50

dosáhly hodnot R_a 2 μm a 3 μm . Význam označení nástrojů z obrázku 28 je v tabulce 22. Jednotlivé naměřené hodnoty drsnosti obrobené plochy jsou uvedeny v příloze 5.

Ze všech zkoušených nástrojů bylo dosaženo nejlepší kvality povrchu s vyměnitelnou břitovou destičkou OEHT0604AESR-MM-P01 upnutou do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01, pokud je kvalita povrchu hodnocena z pohledu průměrné aritmetické úchytky profilu. S touto břitovou destičkou bylo dosaženo velice dobrých výsledků i při upnutí ve fréze 63A04R-S45OE06Z-C-P02. V této variantě byly naměřené hodnoty při jednotlivých posuvech zhruba o 0,5 μm vyšší než u varianty předchozí. Tyto hodnoty však stále řadily tento nástroj do té lepší poloviny z testovaných. Pokud jsou hodnoceny nástroje, s nimiž bylo dosaženo nízké drsnosti povrchu, je nutné zmínit taktéž břitovou destičku OEHT0604AESR-MM-P04 upnutou do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P02. Bohužel při upnutí této břitové destičky do frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01 je výsledná drsnost povrchu velice vysoká, pohybuje se od 2,41 μm do 9,232 μm , což jsou hodnoty vysoce převyšující ostatní zkoušené nástroje. Posledním nástrojem, u kterého byly hodnoty drsnosti R_a menší než 3 μm je vyměnitelná břitová destička Mitsubishi OEMX12T3ESR1 upnutá ve fréze OCTACUT 0634ARB. U tohoto nástroje je možné sledovat při zvyšování hodnoty posuvu snižování drsnosti obrobené plochy, tento paradox však nastal jen v intervalu posuvů 0,2 mm až 0,3 mm.



Obr. 28 průměrná aritmetická úchytky profilu R_a , pro jednotlivé nástroje a posuvy.

Při hodnocení kvality povrchu z hlediska průměrné aritmetické úchytky profilu bylo dále zjištěno, že podprůměrných výsledků především při nižších posuvech dosáhla i fréza Iscar F45KT D063-22-R06 osazenou břitovými destičkami OEMT 060405AER-76. U tohoto nástroje byly naměřeny hodnoty drsnosti R_a v rozmezí 2,62 μm až 4,58 μm . Dalším nástrojem dosahující horší kvalitu povrchu než takřka všechny zkoušené nástroje je vyměnitelná břitová destička OEHT0604AESR-MM-P02 upnutá ve fréze 63A04R-S45OE06Z-C-P01. Tyto nástroje však byly jednoznačně lepší než již zmiňovaná fréza 63A04R-S45OE06Z-C-P02 osazená břitovými destičkami OEHT0604AESR-MM-P04, tu lze označit za nejnevhodnější variantu. Nestandardní

hodnoty byly naměřeny u frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01 osazenu břitovými destičkami OEHT0604AESR-MM-P03, u tohoto nástroje bylo od posuvu na zub 0,15 mm dosaženo vždy velice nízké drsnosti obrobené plochy avšak při posuvu $f_z = 0,10$ mm bylo i při opakovaném testu dosaženo hodnoty $R_a = 3 \mu\text{m}$. Ostatní zmíněné nástroje vesměs dosahovaly hodnot drsnosti obrobené plochy při jednotlivých posuvech, které by bylo možno označit za blízké k hodnotě průměrné.

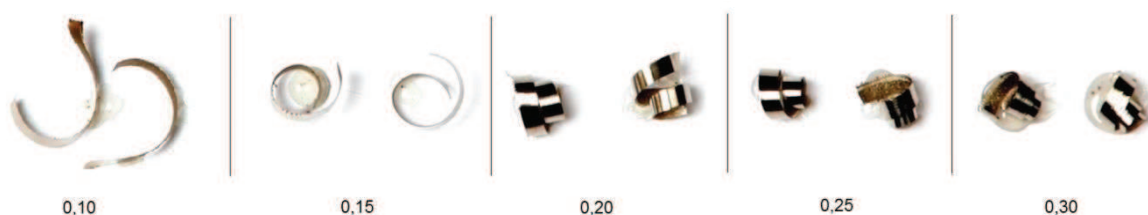
Tab. 22 legenda označení nástrojů k obr. 28.

označení	fréza	VBD
P11	63A04R-S45OE06Z-P01	OEHT0604AESR-MM-P01; M9340
P12	63A04R-S45OE06Z-P01	OEHT0604AESR-MM-P02; M9340
P13	63A04R-S45OE06Z-P01	OEHT0604AESR-MM-P03; M9340
P14	63A04R-S45OE06Z-P01	OEHT0604AESR-MM-P04; M9340
P21	63A04R-S45OE06Z-P02	OEHT0604AESR-MM-P01; M9340
P22	63A04R-S45OE06Z-P02	OEHT0604AESR-MM-P02; M9340
P23	63A04R-S45OE06Z-P02	OEHT0604AESR-MM-P03; M9340
P24	63A04R-S45OE06Z-P02	OEHT0604AESR-MM-P04; M9340
M10	Mitsubishi OCTACUT0634ARB	OEMX 12T3EER1-JS; F7010
M20	Mitsubishi OCTACUT0634ARB	OEMX 12T3ETR1-JS; F620
M30	Mitsubishi OCTACUT0634ARB	OEMX12T3ESR1; F7030
IS50	F45KT D063-22-R06	OEMT 060405AER-76; IC4050

4.3 Utváření třísky

Při předchozí zkoušce zabývající se drsností povrchu byl zkoumán i tvar třísky. Vzorky třísky byly odebrány při frézování každým nástrojem a samozřejmě pro každý použitý posuv v předešlé zkoušce. Jelikož se jednalo o frézování, kde byla frézovaná šířka 50 mm, nemohla vzniknout tříška ve tvaru dlouhé stužky jako při soustružení.

Z podkladku zpracovaných na základě provedených zkoušek, které jsou v příloze 5, je patrné, že tvar třísky je závislý na posuvu. Je možné tedy sledovat, že se zvyšujícím se posuvem dostáváme příznivější tvar třísky, což se projevilo změnou tvaru ze stužkového při posuvu na zub $f_z = 0,1$ mm až po třísky krátké vinuté do relativně nízkého průměru.



Obr. 29 změna tvaru třísky při změně posuvu na zub (0,1 mm až 0,3 mm).

Porovnat můžeme i nástroje se stejnými úhly nastavení s rozdílným provedením čela nástroje. Jedná se o vyměnitelné břitové destičky Mitsubishi Materials OEMX 12T3ESR1 s rovným čelem bez utvařeče třísky a OEMX12T3ETR1-JS s pozitivním úhlem na čele a utvařečem třísky. První z uvedených by měla mít dle označení zaoblené ostří s fazetkou a druhá ostří pouze s fazetkou. Při měření bylo v obou případech naměřeno jen přibližně stejně široké zkosení ostří a to 0,15 mm pod úhlem 24° , více v kapitole věnující se použitým nástrojům. Při tomto porovnání však nebyly zjištěny příliš velké rozdíly ve tvaru třísek. U nástroje s utvařečem byl tvar třísek mírně lepšího tvaru, avšak bylo předpokládáno mnohe lepšího výsledku, než u nástroje bez utvařeče.

Při provedení zkoušky byla zaznamenána stužková tříška u nástroje Iscar. V hojné míře byla zastoupena i tříška vinutá, která by byla v některých případech popsatelná spirálová kuželová, jako například u nástroje firmy Pramet OEHT 0604AESR-MM-P02 ve fríze 63A04R-S45OE06Z-C-P01. Jednotlivé typy jsou na obrázku 30.



Obr. 30 nejčastější typy třísek získaných při zkouškách.

Při porovnání jednotlivých nástrojů je zřejmé, že tříška nejnevhodnějšího tvaru byla získána při obrábění nástroje firmy Iscar, jejichž břitová destička měla relativně malý pozitivní úhel na čele a utvařeč třísky. Mezi nástroje vytvářející méně vhodný tvar třísky patří i nástroje Mitsubishi, který nedisponoval utvařečem OEMX 12T3 ESR1 a nepřiliš lepší výsledky byly dosaženy s nástrojem téže firmy OEMX 12T3 ETR1-JS, jež byl opatřen utvařečem. U ostatních nástrojů byla tříška vinutá, či spirálová, jen při posuvu $f_z = 0,1$ mm připomínala tříška spíše stužkový tvar. Přehled tvaru třísek získaných na základě zkoušky, je v příloze 5.

4.4 Silové zatížení

Silové zatížení nástroje při procesu řezání má přímý vliv na energetickou náročnost tohoto procesu. Při procesu řezání lze rozdělit celkovou řeznou sílu do tří složek. Jedná se o sílu řeznou, posuvovou a pasivní. Řezná síla působí v tečném směru k rotačnímu pohybu nástroje, posuvová síla ve směru pohybu frézy a pasivní síla ve směru osy frézy, směr působení je závislý na geometrii nástroje. Velikost těchto sil je ovlivněna mnoha faktory. Mezi hlavní faktory patří materiál obrobku, řezné podmínky (řezná rychlost, posuv a hloubka řezu) a geometrie nástroje.

Velikost řezných sil jak již bylo řečeno, má vliv energetickou náročnost procesu řezání. S rostoucí energetickou náročností dochází k vyššímu tepelnému namáhání nástroje, jelikož téměř všechna energie je přeměněna na teplo, které je z velké části z oblasti řezu odváděno třískou, dále je vzniklé teplo odváděno obrobkem a část odchází i do okolního prostředí. Rostoucí energetická náročnost má samozřejmě vliv i na potřebný výkon stroje. Minimalizace energetické náročnosti se stává aktuálním trendem společně s minimalizací množství použité procesní kapaliny, tyto trendy jsou zaměřeny na dnes populární téma především v EU, čímž je ekologie.

4.4.1 Zatížení vřetene

Zatížení vřetene bylo odečítáno při zkoušce zkoumající drsnost povrchu obrobené plochy a utváření třísky. Podmínky zkoušky byly totožné jako v kapitole zabývající se zkouškou drsnosti obrobené plochy. Při této zkoušce bylo odečítáno relativní zatížení vřetene, které bylo na stroji udávané procentuálně, kdy 100% udávalo maximální přípustné zatížení vřetene.

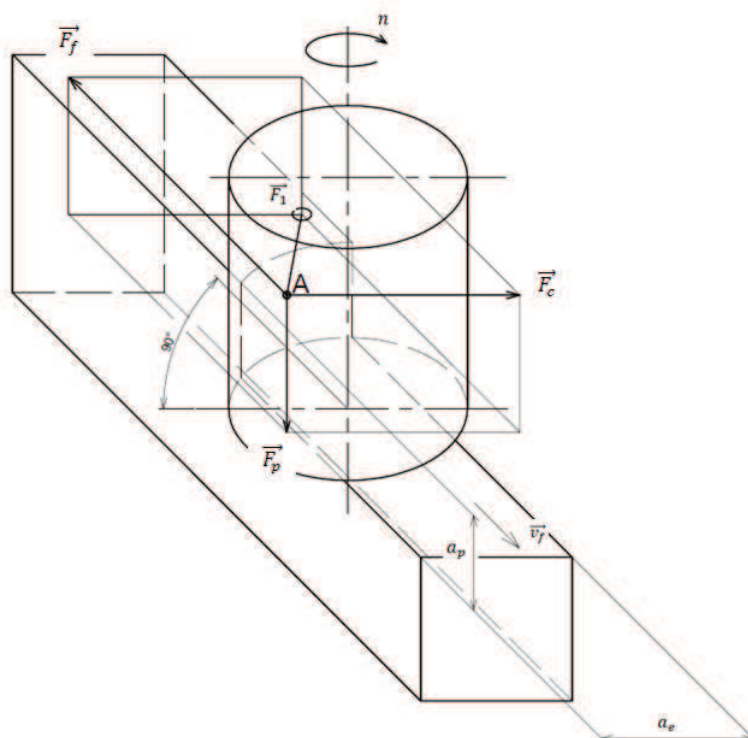
Výsledky měření mají čistě orientační charakter, jelikož pro vybrané nástroje byly v další zkoušce měřeny jednotlivé složky celkové řezné síly. Zatížení vřetene se pohybovalo v rozmezí od 8 % do 14 % dle posuvu na zub, při posuvu $f_z = 0,1$ mm byly hodnoty zatížení vřetene v rozmezí 8 % až 9 %, při posuvu $f_z = 0,3$ mm vzrostlo zatížení vřetene přibližně o 60 % na 13 % až 14 %. U břitových destiček s rovným čelem byly hodnoty o 4 % vyšší u každého posuvu, rozmezí zatížení vřetene bylo tedy 11 % až 19 %. Naměřené výsledky zatížení vřetene pro jednotlivé nástroje a posuvy jsou uvedeny v příloze 5, společně s drsností obrobené plochy a nafoceným vzorkem třísky.

4.4.2 Řezné síly

Srovnání jednotlivých nástrojů bylo provedeno i z hlediska řezných sil. Řezné síly byly měřeny na tříosé frézce FV25CNC A, od výrobce OSO. Parametry tohoto stroje jsou popsány v kapitole 3.1.2. K měření byl využit piezoelektrický dynamometr Kisler 5070 A, hodnoty byly zaznamenávány pomocí softwaru DynoWare.

Jelikož zkouška probíhala mimo zkušebnu firmy Pramet Tools, bylo měření řezných sil provedeno na třech nástrojích Mitsubishi materials, jednom nástroji Iscar a pouze dvou nástrojích Pramet Tools. Z předchozích osmi variant byly na základě rozhodnutí produktového manažera vybrány pouze varianty dvě, u kterých bylo uvažováno o sériové produkci na základě předešlých zkoušek. Jednalo se o frézu 63A04R-S45OE06Z-C-P01, osazenou vyměnitelnými břitovými destičkami OEHT 0604AESR-MM-P01 a OEHT 0604 AESR-MM-P03.

Měření probíhalo na materiálu 12 050.1, jehož mechanické vlastnosti a chemické složení je popsáno v kapitole 4. materiál obrobku. Při měření byla na fréze upnuta pouze jedna vyměnitelná břitová destička, z důvodu snazšího vyhodnocení řezných sil. Vyhodnocení řezných sil probíhala v bodě A dle obrázku 31. V tomto bodě je naměřena nejvyšší hodnota F_y , která by měla odpovídat řezné síle F_c , dále v tomto bodě byly naměřeny hodnoty v osách x a z. Síla působící v ose x je v tomto bodě totožná s posuvovou silou F_f a síla v ose z odpovídající síle pasivní F_p .



Obr. 31 Směry působení zatěžujících sil.

Frézovaná plocha bylo o šířce 50mm, což odpovídá frézované šířce a_e . Zkouška byla prováděna čelním frézováním, kdy osa nástroje odpovídala ose obrobku. Jelikož zkouška probíhala na materiálu 12 050.1, byly změněny řezné podmínky oproti zkouškám, které byly prováděny na korozivzdorné oceli. Tyto řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 23. Při zkoušce nebyla použita procesní kapalina.

Již před provedením zkoušky samotné bylo možno provést předpoklady především na základě geometrií jednotlivých vyměnitelných břitových destiček a úhlech nastavení jednotlivých fréz. Kdy zvyšující se pozitivní úhel na čele břitové destičky, či zvyšující se pozitivní úhel nastavení u fréz zapříčiní snížení celkové řezné síly. Na výslednou celkovou řeznou sílu má vliv i velikost a sklon fazetky, popřípadě zaoblení ostří.

Tab. 23 řezné síly.

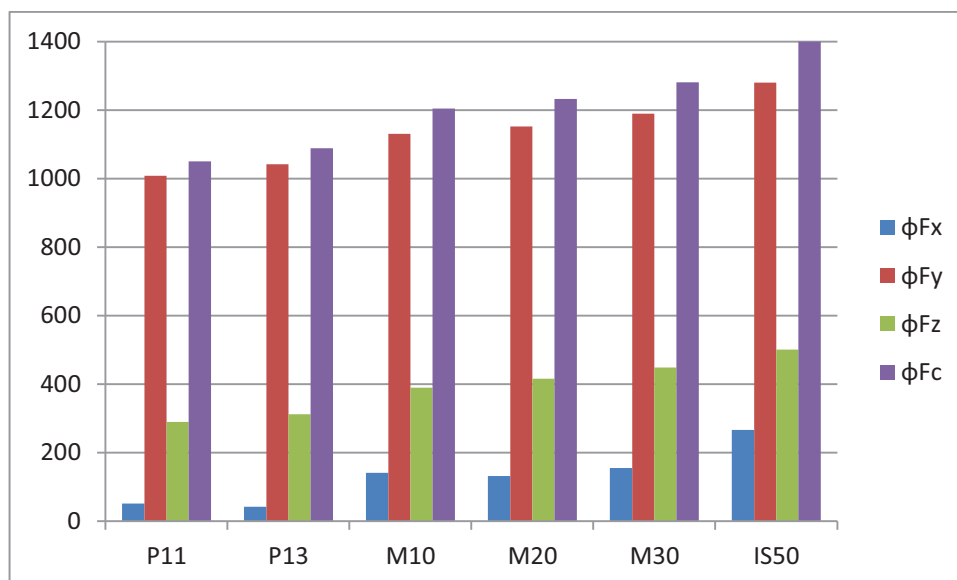
Výrobce: fréza, VBD, (označení v grafu)	F_f [N]	ϕF_f [N]	F_c [N]	ϕF_c [N]	F_p [N]	ϕF_p [N]	F [N]	ϕF [N]
PRAMET: 63A04R-S45OE06Z-C-P01, OEHT0604AESR-MM-P01 (P11)	49,61 54,03	51,8	1014,72 1001,10	1007,9	294,40 284,41	289,4	1057,73 1042,12	1049,9
PRAMET: 63A04R-S45OE06Z-C-P01, OEHT0604AESR-MM-P03 (P13)	40,33 43,25	41,8	1053,01 1030,87	1041,9	316,08 307,91	312	1100,17 1076,75	1088,5
MITSUBISHI: OCTACUT 0634ARB, OEMX1705EER1-JS (M10)	140,04 142,18	141,1	1124,43 1136,95	1130,7	383,92 396,27	390,1	1196,39 1212,40	1204,4
MITSUBISHI: OCTACUT 0634ARB, OEMX1705ETR1-JS (M20)	125,30 139,45	132,4	1159,59 1144,80	1152,2	415,09 417,34	416,2	1238,01 1226,45	1232,2
MITSUBISHI: OCTACUT 0634ARB OEMX1705ESR1 (M30)	162,74 147,48	155,1	1184,99 1194,12	1189,6	444,02 452,66	448,3	1275,87 1285,52	1280,7
ISCAR: F45KT D063-22-R06, OEMT060405AER-76 (IS50)	264,49 268,10	266,3	1300,02 1259,63	1279,8	510,89 491,31	501,1	1421,62 1378,38	1400

Tyto předpoklady lze potvrdit, jelikož nejnížší celkové řezné síly dosáhla výměnitelná břitová destička OEHT 0604AESR-MM-P01. Tato břitová destička má poloměrem zaoblení ostří $r = 0,024$ mm a velice úzkou fazetku takřka s nulovým sklonem, šířka fazetky je pouze 0,06 mm. Za fazetkou je pozitivní sklon čela nástroje a to pod přibližně 11° . K dalšímu snížení úhlu řezu přispívá také použití frézy 63A04R-S45OE06Z-C-P01 s pozitivními úhly nastavení ($+10^\circ$ v axiálním směru a $+6^\circ$ v radiálním směru). Obdobných výsledků dosáhla i druhá zkoušená geometrie firmy Pramet Tools OEHT 0604AESR-MM-P03, která o takřka totožné provedení ostří s fazetkou o 0,01 mm užší a o 3° menším pozitivním úhlem na čele. Břitová destička je upnuta do stejné frézy jako předchozí, úhel řezu je však v tomto zmíněné 3° vyšší než v předešlém případě.

Třetí nejnížší celková řezná síla byla naměřena u výměnitelné břitové destičky Mitsubishi OEMX 1205EER1-JS, upnuté do frézy OCTACUT 0634ARB. Tyto břitové destičky mají zaoblené ostří a pozitivní úhel sklonu čela, přibližně 16° . Velikost zaoblení se nám nepodařilo naměřit, avšak toto zaoblení ovlivňuje ostří v šířce 0,249 mm. Tento nástroj lze přímo porovnat s následující břitovou destičkou OEMX1705ETR1-JS, jež byla osazena do totožné frézy. Tyto nástroje se liší jen provedením ostří, kdy předchozí měla ostří zaoblené a tato následující má ostří s fazetkou. Ostatní parametry těchto břitových destiček jsou takřka totožné. Fazetka břitové destičky OEMX1705ETR1-JS je široky 0,15 mm, má negativní sklon a to 24° . Zvýšení celkové řezné síly je s velkou pravděpodobností způsobeno stlačováním materiálu pod hřbet nástroje, které je zapříčiněno širokou negativní fazetkou.

Nejvyšších hodnot celkové řezné síly dosáhly nástroje s rovným, či takřka rovným čelem. Druhá nejvyšší hodnota řezné síly byla naměřena u nástroje Mitsubishi, s břitovou destičkou OEMX1705ESR1 upnutou ve fréze OCTACUT 0634ARB. Tato břitová destička má ostří zaoblené s fazetkou, avšak při našem měření byla naměřena jen fazetka negativního sklonu o šířce 0,137 mm. Provedení čela je rovné. Fréza, ve které je tato břitová destička má pozitivní axiální úhel nastavení ($+13^\circ$) a negativní radiální úhel nastavení (-4°) což úhel řezu ještě zvýší.

Nejvyšší celková řezná síla i její jednotlivé složky byly naměřeny i nástroje Iscar. Zde byla fréza F45KT D063-22-R06 osazena vyměnitelnou břitovou destičkou OEMT060405AER-76. Břitová destička má zaoblené ostří, o poloměru 0,08 mm. Tvarem příliš nepřipomínající kruhovou výseč, spíše negativně skloněnou fazetku šířky 0,2 mm. Čelo tohoto nástroje není zcela rovné, ale má sklon pozitivní $4^\circ 30'$. Úhly nastavení na této fréze jsou $+15^\circ$ v axiálním směru a $+2^\circ$ ve směru radiálním. Vysoké naměřené hodnoty řezné síly byly předpokládány právě na základě relativně velkého poloměru zaoblení ostří a malého pozitivního úhlu čela.



Obr. 32 graf naměřených řezných sil.

4.5 Efektivnost

Vyhodnocení efektivnosti bylo provedeno na základě teoretických poznatků uvedených v kapitole 2.6 hodnocení efektivnosti frézovacích nástrojů. Bohužel pro výsledné hodnocení nebyly dodrženy všechny předpoklady, ohledně dosažené kvality obrobeného plochy. Dosažení totožné kvality obrobené plochy s různými nástroji je všeobecně velice problematické. Z hlediska drsnosti hodnocené průměrnou aritmetickou úchylkou profilu se její hodnoty při posuvu $f_z = 0,15$ mm pohybovala v rozmezí $0,61 \mu\text{m}$ až $1,6 \mu\text{m}$ u nástrojů s utvařečem. Drsnost u nástrojů bez utvařeče se tato hodnota zvýšila až na $2,62 \mu\text{m}$. V těchto hodnotách nejsou uvedeny hodnoty drsnosti nástrojů, u kterých se nepočítá se sériovou produkcí, u nichž byla naměřená drsnost i přes $3 \mu\text{m}$. Na obrobené ploše lze hodnotit také velikost a orientaci zbytkových napětí, tvrdost, či další parametry mikrogeometrie. Pro hodnocení efektivnosti byly tyto parametry kvality povrchu zanedbány.

Pro hodnocení efektivnosti jednotlivých byly použity hodnoty trvanlivosti z kapitoly 5.1.2, ve které byla měřena trvanlivost jednotlivých nástrojů na materiálu 17 240.4. Dále byly pro výpočet efektivnosti použity odpovídající řezné podmínky, u kterých je rozdílná hodnota otáček na minutu, z důvodů odlišného značení průměru frézy firmou Mitsubishi, otáčky byly tedy přepočítány pro zachování řezné rychlosti $140 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Dále je rozdílná hodnota počtu zubů u frézy Iscar, jelikož tato firma nenabízí frézu se čtyřmi zuby. Přehled zbylých hodnot potřebných pro určení efektivnosti nástrojů je shrnut v tabulce 24. Cena jednotlivých VBD byla získána na základě nabídky z listopadu roku 2013 po případných slevách bez DPH.

Tab. 24 parametry nástrojů potřebné pro výpočet efektivnosti.

Výrobce	označení frézy, VBD	počet zubů frézy [-]	otáčky n [min^{-1}]	trvanlivost ostří [min]	cena VBD bez DPH [Kč]
Pramet Tools	63A04R-S45OE06Z-C-P01, OEHT 0604 AESR-MM-P01	4	707	35,2	228,00
Pramet Tools	63A04R-S45OE06Z-C-P01, OEHT0604AESR-MM-P03	4	707	41,9	228,00
Mitsubishi materials	OCTACUT 0634ARB, OEMX12T3EER1-JS	4	810	31,2	202,50
Mitsubishi materials	OCTACUT 0634ARB, OEMX12T3ETR1-JS	4	810	20,3	202,50
Mitsubishi materials	OCTACUT 0634ARB, OEMX12T3ESR1	4	810	34,6	202,50
Iscar	F45KT D063-22-R06, OEMT 060405AER-76	5	707	20	222,60

Z výše uvedených hodnot lze na základě vzorců 7, 8 a 9 uvedených v kapitole 2.6 hodnocení efektivnosti řezných nástrojů určit výslednou efektivnost jednotlivých nástrojů. Výpočet byl proveden na základě vzorové výpočet efektivnosti pro vyměnitelné břitové destičky OEMX12T3EER1-JS upnutý ve fréze OCTACUT 0634ARB:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = 0,15 \cdot 4 \cdot 810 = 486 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$Q = \frac{a_e \cdot v_f \cdot a_p}{10^3} = \frac{50 \cdot 486 \cdot 2,5}{10^3} = 60,75 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

$$N_e = \frac{10^3 \cdot z \cdot \frac{N_p}{q}}{T \cdot Q} = \frac{10^3 \cdot 4 \cdot \frac{202,5}{8}}{31,2 \cdot 60,75} = 53,42 \text{ Kč} \cdot \text{dm}^{-3}$$

Pro výpočet nákladů na jednotku odebraného materiálu ze známých hodnot byla nejdříve vypočítána rychlost posuvu, která byla následně dosazena do vzorce pro určení úběru obráběného materiálu za jednotku času. Při získání hodnoty úběru obráběného materiálu za jednotku času byly k dispozici všechny potřebné hodnoty pro výpočet nákladů na jednotku odebraného materiálu.

Tab. 25 výsledky výpočtu nákladů na jednotku odebraného materiálu.

Výrobce	označení frézy, VBD	rychlost posuvu v_f [mm · min ⁻¹]	minutový úběr Q [cm ³ · min ⁻¹]	Náklady N_e [Kč · dm ⁻³]
Pramet Tools	63A04R-S45OE06Z-C-P01, OEHT 0604 AESR-MM-P01	424,2	53,025	61,08
Pramet Tools	63A04R-S45OE06Z-C-P01, OEHT0604AESR-MM-P03	424,2	53,025	51,31
Mitsubishi materials	OCTACUT 0634ARB, OEMX12T3EER1-JS	486	60,75	53,42
Mitsubishi materials	OCTACUT 0634ARB, OEMX12T3ETR1-JS	486	60,75	82,10
Mitsubishi materials	OCTACUT 0634ARB, OEMX12T3ESR1	486	60,75	48,17
Iscar	F45KT D063-22-R06, OEMT 060405AER-76	530,25	66,28	104,95

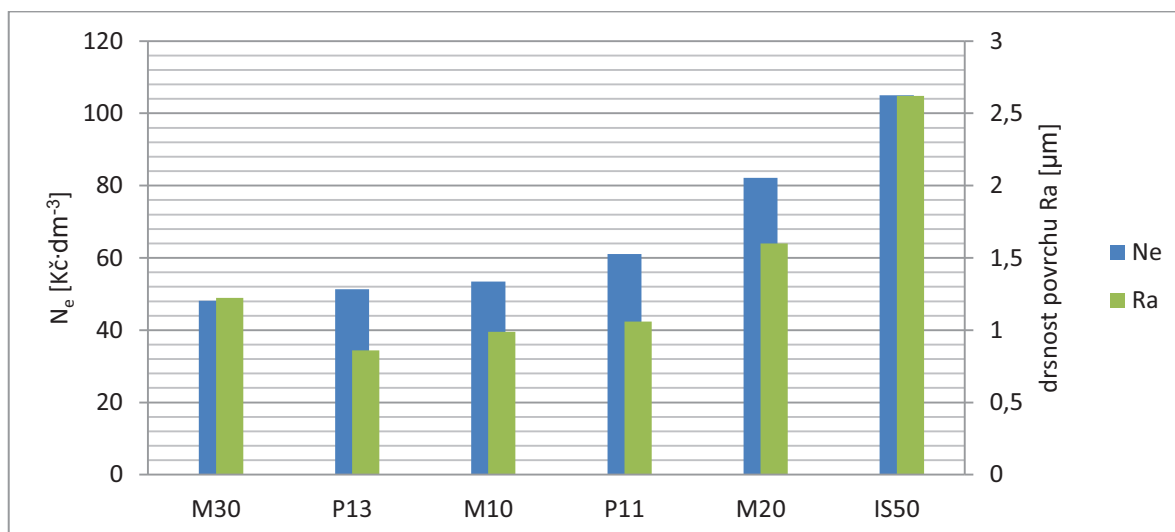
Výsledná efektivnost jednotlivých hodnocených nástrojů udána pomocí nákladů na jednotku odebraného materiálu je uvedena v tabulce 25. Pokud uvažujeme pouze efektivnost z tohoto hlediska, pořadí je jednoznačně dané. Nejnížší náklady na jednotky odebraného materiálu má fréza OCTACUT 0634ARB výrobce Mitsubishi Materials osazenou vyměnitelnými břitovými destičkami OEMX 12T3ESR1.

Druhým nejefektivnějším nástrojem byla fréza 63A04R-S45OE06Z-C-P01 osazena vyměnitelnými břitovými destičkami OEHT0604AESR-MM-P03. Rozdíl v nákladech na jednotku odebraného materiálu činí přibližně 6,5 %. Výsledky byly však zpracovány z malého počtu provedených zkoušek, například trvanlivost byla měřena vždy jen na dvou vzorcích. Rozptyl naměřených trvanlivostí činil v některých případech i přes 10 %, proto nelze s jistotou určit správně pořadí jednotlivých nástrojů, při těchto velmi nízkých rozdílech. Velmi nízkých nákladů na decimetr krychlový odebraného materiálu dosáhla i fréza OCTACUT 0634ARB osazena vyměnitelnými břitovými destičkami OEMX 12T3EER1-JS. Nárůst uvedených nákladů oproti nástroji s nejvyšší efektivností je zhruba 11 %.

U dalších nástrojů nelze předpokládat žádné změny v pořadí při seřazení nástrojů dle efektivnosti ani při dalším opakování zkoušek. Samozřejmě i u těchto nástrojů by byly ovlivněny výsledné náklady na jednotku objemu odebraného materiálu. Tyto rozdíly mezi jednotlivými nástroji však při seřazení zkoušených nástrojů dle efektivnosti dosahovaly 20 % až 30 %.

4.6 Vyhodnocení provedených experimentů

Cílem práce bylo hodnocení efektivnosti zvolených frézovacích nástrojů. Efektivnost byla určena pomocí nákladů na jednotku odebraného materiálu v kapitole 4.5. V tomto výpočtu však není zohledněna dosažená kvalita povrchu, utváření třísky, či silové zatížení nástroje. Tyto parametry však nebyly konstantní, proto na ně byly zaměřeny jednotlivé funkční zkoušky. Zde jsou hodnoceny jen nástroje, které byly podrobeny všem prováděným funkčním zkouškám.



Obr. 33 porovnání nákladů na jednotku odebraného materiálu a drsnosti povrchu při $f_z = 0,15$ mm.

Pomocí obrázku 33 lze snadno porovnat náklady na jednotku objemu odebraného materiálu zkoušených frézovacích nástrojů a dosažené drsnosti povrchu obrobené plochy R_a za konstantních řezných podmínek. Srovnání je vhodné rozšířit také o řezné síly, které jsou reprezentovány celkovou řeznou silou přepočtenou v poměru k celkové řezné síle nástroje M30, jež jsou uvedené v grafu na obrázku 34. Označení nástrojů je dle tabulky 26. Nástroje jsou dále seřazeny a uvedeny dle nákladů na jednotku objemu odebraného materiálu.

Z uvedených obrázků zjistíme, že nejlépe hodnocený nástroj dle nákladů na jednotku odebraného materiálu M30, dosáhl drsnosti povrchu $R_a = 1,224$ μm. Tato hodnota drsnosti je u frézování považována za velice nízkou, současně je třeba podotknout, že u poloviny zkoušených nástrojů bylo dosaženo ještě nižší drsnosti povrchu. Z hlediska silového zatížení byla u tohoto nástroje naměřena druhá nejvyšší hodnota celkové řezné síly.

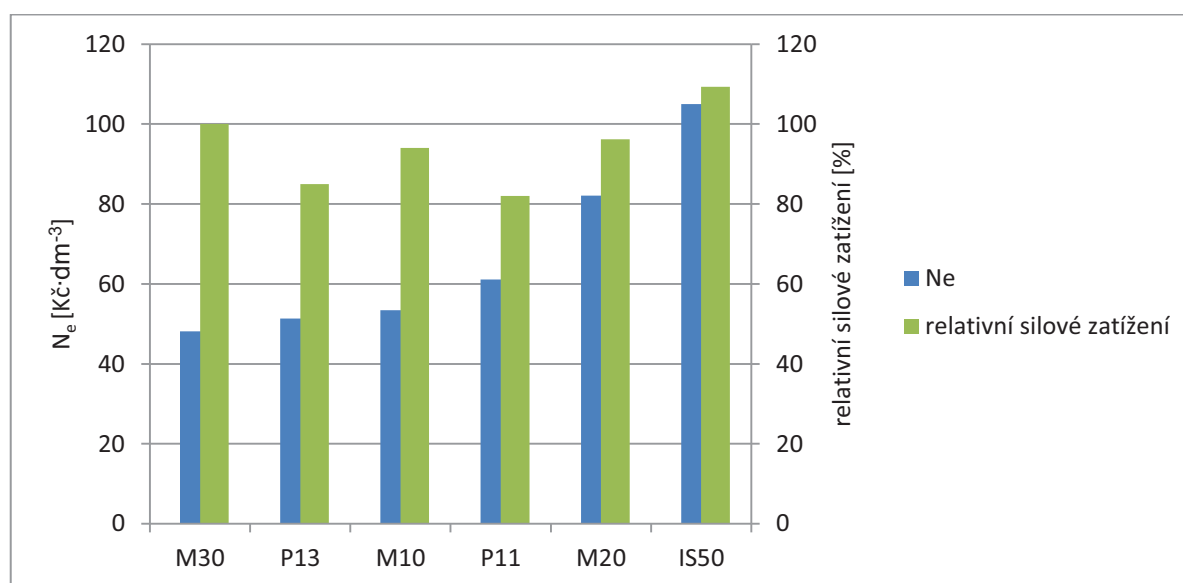
Nástroj P13, který byl z hlediska nákladů na jednotku odebraného materiálu druhý, dosáhl nejnižší hodnoty drsnosti obrobené plochy. Současně ze zkoušených nástrojů dosahoval druhého nejnižšího silového zatížení. Celkové řezná síla byla o 15 % nižší než u nástroje M30.

Tab. 26 legenda označení nástrojů.

označení	výrobce	fréza	VBD
P11	Pramet Tools	63A04R-S45OE06Z-P01	OEHT0604AESR-MM-P01; M9340
P13	Pramet Tools	63A04R-S45OE06Z-P01	OEHT0604AESR-MM-P03; M9340
M10	Mitsubishi Materials	OCTACUT 0634ARB	OEMX 12T3EER1-JS; F7010
M20	Mitsubishi Materials	OCTACUT 0634ARB	OEMX 12T3ETR1-JS; F620
M30	Mitsubishi Materials	OCTACUT 0634ARB	OEMX12T3ESR1; F7030
IS50	Iscar	F45KT D063-22-R06	OEMT 060405AER-76; IC4050

Dle daného řazení lze konstatovat, že u dalších hodnocených nástrojů kromě růstu nákladů N_e bylo dosahováno také vyšších hodnot drsnosti povrchu. Nástrojem s třetími nejnižšími náklady N_e je M10. U tohoto nástroje vzrostly náklady N_e o 4 % a zároveň bylo dosaženo vyšší drsnosti, a to přibližně $1 \mu\text{m}$. Celková řezná síla byla o 6 % nižší než u nástroje M30, a současně však o 9 % až 12 % vyšší než u nástrojů Pramet Tools. Třísky byla při daném posuvu tvaru stužkového až spirálového.

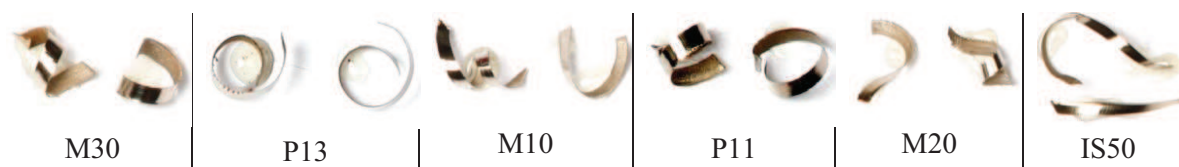
Nástroj P11 měl náklady na jednotku objemu odebraného materiálu o 26 % vyšší oproti nástroji M30. Dosahovaná drsnost povrchu obrobené plochy tohoto nástroje je však při stejném srovnání lepší. Nástroj P11 dosáhl nejnižší celkové řezné síly ze všech hodnocených nástrojů, což je o 18 % nižší hodnota než v případě nástroje M30. Tento rozdíl může být zásadní při volbě nástroje, jelikož pro použití tohoto nástroje bude dostačující stroj s nižším výkonem.



Obr. 34 porovnání nákladů na jednotku odebraného materiálu a celkové řezné síly vztažené k M30.

Nástroj M20 dosahoval nákladů N_e o 70 % vyšších než nástroj M30. Drsnost obrobené plochy $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ patří taktéž k horším naměřeným hodnotám. Celková řezná síla dosažena je o 4 % nižší než u nástroje M30. Na zhoršenou drsnost může mít vliv i široká negativně skloněná fazetka na čele vyměnitelné břitové destičky.

Jednoznačně nejhorších výsledků takřka ve všech testech bylo dosaženo s nástrojem IS50, jehož náklady N_e byly více než dvojnásobné oproti nástroji M30. Drsnost povrchu obrobené plochy přesáhla hodnotu $R_a = 1,6 \mu\text{m}$. Celková řezná síla byla jako jediná u tohoto nástroje vyšší než u nástroje M30 a to o více než 9 %. Tvar třísky u tohoto nástroje byl stužkový. Na tyto výsledky mohl mít vliv například relativně velký poloměr zaoblení ostří, či malý úhel čela.



Obr. 35 Tvar třísky při posuvu $f_z = 0,15 \text{ mm}$.

4.7 Doporučení

Z průzkumu trhu, provedení jednotlivých zkoušek a jejich vyhodnocení vzešly následující doporučení.

Při provádění zkoušek trvanlivosti bylo vycházeno z řezných podmínek doporučených ostatními výrobci, se kterými bylo uskutečněno srovnání. Jelikož se jedná o nové geometrie nástrojů využívajících nové materiály, je důležité pro tyto nástroje určit rozmezí vhodných řezných podmínek, pokud možno provedením zkoušek alespoň na etalonu korozivzdorných ocelí.

Dosažené výsledky by bylo vhodné ověřit prostřednictvím více měření. Pro zkoušky s rozptylem hodnot do 5 % alespoň na 3 až 5 měření. U zkoušek s rozptylem vyšším toto množství zkoušek adekvátně navýšit.

Dále by bylo vhodné rozšířit zkoušky na další korozivzdorné oceli, alespoň pro zástupce jednotlivých skupin korozivzdorných ocelí. Například po vzoru firmy Iscar, která doporučuje různé řezné podmínky dle druhu korozivzdorné oceli (feritické, austenitické, martenzitické a duplexní).

Z hlediska výzkumu by bylo vhodné rozšířit provedené zkoušky o měření s procesní kapalinou. Měření prováděná s procesní kapalinou by mohla ovlivnit nejen trvanlivost ostří, ale také například optimální řezné podmínky.

Při porovnání s konkurencí si lze povšimnout různých rozměrových tolerancí vyměnitelných břitových destiček. V označení břitové destičky se jedná o třetí písmeno. Firma Pramet Tools i Iscar používají toleranci značenou M, firma Mitsubishi Materials používá toleranci s označením H. Rozdíl mezi tolerancí označenou „M“ a „H“ může znamenat významný nárůst nákladů na výrobu. Vyměnitelnou břitovou destičku s tolerancí „M“ lze vyrobít technologií přesného lisování, avšak při potřebě dosáhnout přesnějších rozměrů jako jsou u tolerancí označených „H“ je nutné použít i obvodové broušení. Při optimalizaci nákladů změnou zmíněné technologie a vlivem objemu výroby je možné snížit výrobní náklady takřka o 50 %.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce vyhodnotila efektivnost frézování korozivzdorných ocelí při použití oktagonálních vyměnitelných břitových destiček. Srovnání bylo prováděno mezi nástroji Pramet Tools, Mitsubishi Materials a Iscar.

V rámci hodnocení efektivnosti frézování bylo provedeno měření trvanlivosti nástrojů při obrábění korozivzdorných ocelí ČSN 17 349.4 a ČSN 17 240.4, drsnosti obrobené plochy, řezných sil a utváření třísky. Z rozboru experimentálních výsledků vyplývá:

- nejnižší dosažené náklady na odebrání jednotky objemu materiálu byly u zkoušených frézovacích nástrojů $48,17 \text{ Kč} \cdot \text{dm}^{-3}$ a to u frézy OCTACUT 0634ARB osazené vyměnitelnými břitovými destičkami OEMX12T3ESR1,
- zkoušené nástroje měly velice rozdílné náklady na odebrání jednotky objemu materiálu, nejvyšší rozdíl mezi těmito náklady činil 117 %,
- dosahovaná drsnost povrchu obrobené plochy za konstantních podmínek byla značně rozdílná, při posuvu $f_z = 0,15 \text{ mm}$ dosahovala hodnot R_a od $0,86 \mu\text{m}$ do $2,62 \mu\text{m}$,
- jednotlivé firmy používají pro výrobu vyměnitelných břitových destiček rozdílné technologie výroby což je patrné z označení tolerance rozměrů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Korozivzdorné oceli - vlastnosti. In: *Vlastnosti korozivzdorných ocelí* [online]. Vydání 2002. Lucembursko: Euro Inox, 2002, 28 s. ISBN 2-87997-082-2 [vid. 2014-01-25]. Dostupné z: http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf
2. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
3. ISO M Korozivzdorné oceli. In: *ISO M Korozivzdorné oceli* [online]. Vydání 2002. Lucembursko: Euro Inox, 2002, 28 s. ISBN 2-87997-082-2 [vid. 2014-04-25]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx
4. *MM Průmyslové spektrum: Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály*. Praha: Vogel Publishing, 2003, roč. 2003, č. 7. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2-2.html>
5. HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno. CCB, 1995, 265 s. ISBN 80-858-2510-4.
6. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
7. MÁDL, J., KAFKA, J., VRABEC, M., DVOŘÁK, R. *Technologie obrábění: 1. díl*. Praha. ČVUT, 2000, 79 s. ISBN 80-010-2091-6.
8. ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1999, 437 s. ISBN 80-200-0671-0.
9. PROKOP, Jaroslav. *Aplikovaná teorie obrábění: Fyzikální základy procesu řezání*.
10. STAINLESS, prepared by TMR. *Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels* [online]. 2nd ed. London: International Molybdenum Association, 2009 [vid. 2014-05-29]. ISBN 978-190-7470-004. Dostupné z: http://www.euro-inox.org/pdf/map/Guidelines_Fabrication_Duplex_EN.pdf
11. Pramet Tools s.r.o. *Katalog frézování 2014* [online]. [2014] [vid 2014-05-22]. Dostupné z: www.pramet.cz
12. Mitsubishi Materials. *Catalogue of Rotating Tools* [online]. [2014] [vid 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.mitsubishicarbide.com/EU/West/product/catalog/catalog.html>
13. Iscar. *Milling systems 2012* [online]. [2012] [vid 2014-05-22]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/iscar-tools/milling-systems/5692-318285.html>

14. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. *ČSN online* [online]. [vid. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/csn-on-line>
15. Bolzano. *Materiálové listy* [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z:
[http://www.bolzano.cz/cz/technicka-prirucka/
vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/
vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy](http://www.bolzano.cz/cz/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	[%]	tažnost (trvale prodloužení délky po přetržení)
a_e	[mm]	šířka řezu
a_p	[mm]	hloubka řezu
b_D	[mm]	tloušťka třísky
Cr_{ek}	[%]	chrómový ekvivalent
F	[N]	síla celková řezná síla
f	$[mm \cdot min^{-1}]$	posuv
F_c	[N]	řezná síla
FCC		krystalická mřížka kubické plošně středěná
F_f	[N]	posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
f_z	[mm]	posuv na zub
HCP		šesterečná krystalická mřížka
h_D	[mm]	výška třísky
HSS		rychlořezná ocel
k_c		měrná řezná síla
n	$[min^{-1}]$	otáčky
Ni_{ek}	[%]	niklový ekvivalent
PVD		fyzikální metoda nanášení povlaku na nástroj
Q	$[cm^3 \cdot min^{-1}]$	minutový úběr materiálu
R_e	[MPa]	mez pružnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
t	[s]	čas
T	[s]	trvanlivost
TiC		karbid titanu
VBD		vyměnitelná břitová destička
v_c	$[m \cdot min^{-1}]$	řezná rychlost

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Provedení ostří zkoušených VBD
Příloha 2	Reálné parametry fréz
Příloha 3	Opotřebení VBD Pramet Tools ke zkoušce trvanlivosti na 17 349.4
Příloha 4	Opotřebení VBD ke zkoušce trvanlivosti na 17 240.4
Příloha 5	Drsnost povrchu obrobené plochy, utváření třísky, zatížení vřetene