

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných
materiálů**

Bakalářská práce

Praha 2021/2022

Autor: Minh Tu Trinh

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Studijní program: Teoretický základ strojího inženýrství



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Trinh** Jméno: **Minh Tu** Osobní číslo: **495467**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů

Název bakalářské práce anglicky:

Tools for machining of difficult-to-cut materials

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Nástrojové materiály
3. Technologické možnosti, fezné podmínky a dosahované parametry

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů“ vypracoval samostatně a s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Praze, dne

Datum

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Vítězslavovi Rázkovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Romanovi Maršíčkovi z Dormer Pramet s.r.o za poskytnuté podklady, které jsem využil ve své práci. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a přátelům za podporu a pomoc při dosavadních studiích.

Anotace

- Autor:** Minh Tu Trinh
- Název práce:** Nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů
- Rozsah práce:** 84 stránek, 70 obrázků, 12 tabulek
- Akademický rok:** 2021/2022
- Studijní program:** Teoretický základ strojního inženýrství
- Ústav:** Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
- Vedoucí práce:** Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
- Abstrakt:** Bakalářská práce popisuje problematiku obrábění, především soustružení těžkoobrobitelných materiálů. Práce se zabývá zkoumáním řezných nástrojů (geometrie řezného nástroje, řezný materiál, utváření třísek, řezné síly, řezné podmínky, řezné prostředí) pro obrábění materiálů skupiny ISO – S, kam patří především slitiny těchto materiálů: titan, nikl a kobalt.
- Klíčová slova:** Titanové slitiny, niklové slitiny, obrobitelnost materiálu, řezné nástroje, obrábění

Annotation

Author:	Minh Tu Trinh
Thesis title:	Tools for machining difficult-to-machine materials
Thesis extent:	84 pages, 70 pictures, 12 charts
Academic year:	2021/2022
Study programme:	Theoretical basis of mechanical engineering
Institute:	Department of Machining Technology, Design and Metrology
Thesis supervisor:	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Abstract:	<p>The bachelor's thesis describes the issue of machining, especially the turning of hard-to-machine materials. The work deals with the investigation of cutting tools (geometry of the cutting tool, cutting material, chip formation, cutting forces, cutting conditions, cutting environment) for machining materials of the ISO – S group, which mainly includes alloys of these materials: titanium, nickel and cobalt.</p>
Key words:	Titanium alloys, nickel alloys, machinability of the material cutting tools, machining

Seznam použitých symbolů a zkratek

v_c	řezná rychlost [m/min]
a_p	hloubka řezu [mm]
<i>CNC</i>	Computer Numerical Control
<i>VBD</i>	vyměnitelný břitová destička
<i>PVD</i>	Physical vapour deposition
<i>CVD</i>	Chemical vapour deposition
<i>MTCVD</i>	Medium temperature CVD
<i>PECVD</i>	Plasma enhanced CVD
<i>MWPCVD</i>	Microwave plasma CVD
<i>PCD</i>	polykrystalický diamant
<i>PCBN</i>	polykrystalický nitrid bóru
<i>CBN</i>	kubický nitrid bóru
<i>SK</i>	slinutý karbid
<i>KF</i>	vzdálenost žlábků od čela [μm]
<i>KT</i>	hloubka žlábků [μm]
<i>KB</i>	šířka žlábků [μm]
<i>VB</i>	opotřebení na hřbetě [μm]
VB_B	opotřebení přímé části ostří (průměrné) [μm]
VB_{MAX}	opotřebení maximální [μm]
VB_N	opotřebení ve formě vrubu [μm]
VB_C	opotřebení v oblasti špičky nástroje [μm]

Obsah

Čestné prohlášení	3
Poděkování.....	4
Anotace	5
Annotation	6
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	7
Úvod.....	11
1. Obecné pojmy a terminologie technologie obrábění	12
1.1 Technologie obrábění.....	12
1.1.1 Soustružení.....	12
2. Charakteristika těžkoobrobitelných materiálů	14
2.1 ISO – M.....	14
2.2 ISO – H	15
2.3 ISO – S	15
2.3.1 Slitiny niklu.....	16
2.3.2 Slitiny kobaltu.....	17
2.3.3 Titan a jeho slitiny	18
2.4 Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů.....	20
2.4.1 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí.....	21
2.4.2 Obrobitelnost niklových slitin	21
2.4.3 Obrobitelnost kobaltových slitin.....	21
2.4.4 Obrobitelnost titanových slitin.....	22
3. Nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů.....	22
3.1 Řezný nástroj.....	22
3.2 Geometrie řezného nástroje.....	24
3.2.1 Nástrojové roviny	24
3.3 Řezné podmínky.....	25
3.4 Mechanismus tvorby třísky	27
3.4.1 Druhy třísek	28

3.4.2	Vznik tvářené třísky	30
3.4.3	Tvorba třísky při obrábění těžkoobrobitelných materiálů	31
3.4.4	Faktory ovlivňující oblast primární plastické deformace	31
3.4.5	Oblast sekundární plastické deformace	33
3.5	Silové jevy při obrábění	33
3.5.1	Měrná řezná síla.....	36
3.6	Teplo a teplota řezání	36
3.6.1	Teplo při obrábění.....	36
3.6.2	Teplota řezání	38
3.6.3	Teplotní pole nástroje a obrobku	38
3.7	Trvanlivost nástroje.....	39
3.8	Řezné prostředí.....	41
3.8.1	Vodní roztoky	41
3.8.2	Emulzní kapaliny	41
3.8.3	Řezné oleje.....	41
3.9	Opotřebení řezných nástrojů	42
4.	Nástrojové materiály	46
4.1	Slinuté karbidy	46
4.1.1	Nepovlakované slinuté karbidy	47
4.1.2	Povlakované slinuté karbidy.....	49
4.1.3	Moderní metody povlakování.....	52
4.2	Řezná keramika.....	52
4.3	Polykrystalický nitrid bóru (PKNB)	55
4.4	Polykrystalický diamant (PKD)	56
5.	Přehled vybraných destiček	57
5.1	Dormer pramet	57
5.2	Sandvik Coromant.....	58

5.3	Kennametal	59
5.4	Seco-tools	59
5.5	Walter-tools	60
5.6	Iscar	61
6.	Technologické zkoušky	62
6.1	První část – utváření třísky	63
6.2	Druhá část – trvanlivost nástroje	66
	Závěr	75
	Použité a doporučené zdroje	78
	Seznam obrázků	81
	Seznam tabulek	84

Úvod

Tato bakalářská práce popisuje problematiku obrábění, především soustružení těžkoobrobitelných materiálů. Práce se zabývá zkoumáním řezných nástrojů (geometrie řezného nástroje, řezný materiál, utváření třísek, řezné síly, řezné podmínky, řezné prostředí) pro obrábění materiálů skupiny ISO – S, kam patří především slitiny těchto materiálů: titan, nikl a kobalt.

Náročnější materiály vyžadují zavádění nových pokročilých přístupů a progresivních řezných nástrojů.

Obrobitelnost těchto vysoce výkonných a náročných materiálů je velice obtížná. Mezi faktory, které je označují jako těžkoobrobitelné, patří nízká tepelná vodivost, malý modul pružnosti, zachování tvrdosti při zvýšených teplotách a chemická reaktivita s materiály řezných nástrojů. Tyto vlastnosti k inovativním způsobům technologii obrábění se zaměřením na výrobu špičkových řezných nástrojů a jejich povlaků.

Uplatnění těžkoobrobitelných materiálů se stále rozšiřuje. Titan se už nepoužívá jenom v leteckém a kosmickém průmyslu, ale například také v lékařském průmyslu pro výrobu tělních implantátů, v lodním průmyslu na komponenty lodí a ponorek, v automobilovém průmyslu apod. Nikl slouží pro legování ocelí, ale nachází uplatnění také při ražbě mincí a při výrobě šperků.

Druhá část práce je věnována technologické zkoušce. Zkouška se člení na dvě části. První část zkoušky je utváření třísek, dále bude zkouška trvanlivosti nástroje. Více podrobností budou uvedeny v jednotlivých kapitolách.

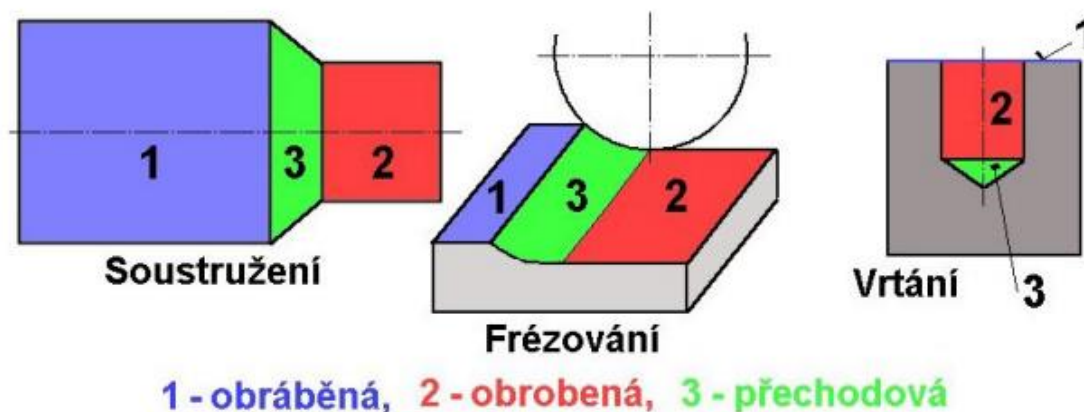
1. Obecné pojmy a terminologie technologie obrábění

1.1 Technologie obrábění

Obrábění je technologický proces, při kterém se vytváří požadovaný tvar součástí úběrem materiálu mechanickým oddělováním materiálu ve formě třísky břitem obráběcího nástroje nebo elektrickými, elektrochemickými a dalšími metodami.

Hlavní prvky v procesu obrábění je obrobek a nástroj. Obrobek z geometrického hlediska je charakterizován obráběnou, obrobenou a přechodovou plochou, (viz obr. 1). Obráběná plocha je plocha získaná jako výsledek řezného procesu. Přechodová plocha je část povrchu obrobku, která je vytvořena působením ostří nástroje během zdvihu nebo otáčky nástroje nebo obrobku. Obrobená plocha představuje prioritní výstup obráběcího procesu a z technologického hlediska je určena svými rozměry, tvarem, polohou, strukturou povrchu a vlastnostmi povrchové vrstvy. Druhým prvkem je nástroj, který je charakterizován řezným materiálem a geometrií. Pro různé technologie obrábění se používají různé nástroje.

Podrobněji bude uveden pouze proces obrábění soustružení, vzhledem k tomu, že technologická zkouška na závěru práce se věnuje právě soustružení.



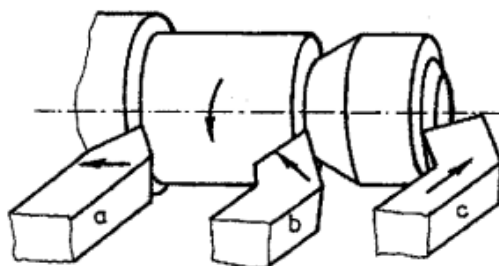
Obr. 1: Plochy na obrobku [3]

1.1.1 Soustružení

Soustružení je nejpoužívanější metodou obrábění a patří k nejstarším výrobním metodám. Je určeno především k obrábění rotačních ploch vnější i vnitřních. Touto metodou je dále možné obrábět válcové rotační plochy, kuželové a kulové rotační plochy. Tvarovými noži lze na soustruhu řezat závity a obrábět čelní rovinné plochy.

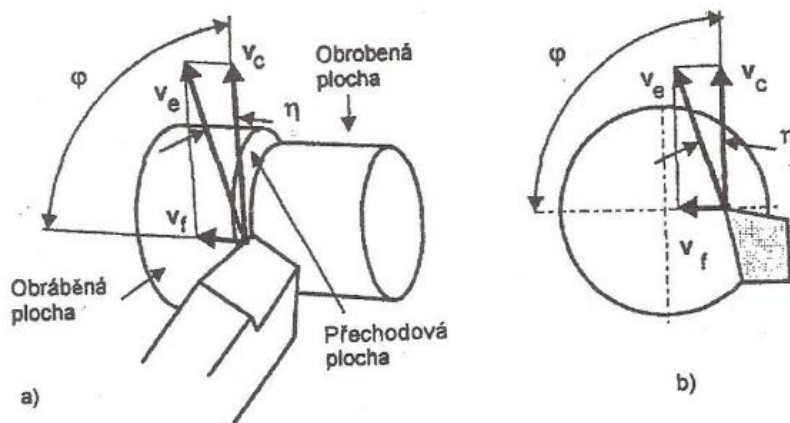
Hlavním řezným pohybem při soustružení je rotační pohyb obrobku. Nástroj koná vedlejší pohyby, tj. podélný posuv, rovnoběžně s osou otáčení obrobku. Příčný posuv je kolmý k ose obrobku.

Výsledkem podélného posuvu (obr. 2a) je válcová plocha, výsledkem příčného posuvu (obr. 2b) je čelní rovinná plocha. Obecný soustružení, viz (obr. 2c). Kromě posuvu koná nástroj ještě přísuv. Tímto pohybem, který probíhá před obráběním, se nastavuje požadovaná hloubka řezu.



Obr. 2: Základní pohyby při soustružení [1]

Při soustružení válcové plochy za konstantních otáček obrobku n a konstantní posuvové rychlosti v_f bude řezná rychlost v_c a rychlost řezného pohybu v_e rovněž konstantní. Při soustružení čelní plochy za konstantních otáček obrobku n a konstantní posuvové rychlosti v_f bude řezná rychlost v_c a rychlost řezného pohybu v_e měnit v závislosti na aktuálním průměru obrobku.[1]



Obr. 3: Vektory pohybů při soustružení a) podélné soustružení válcové plochy b) příčné soustružení čelní plochy [5]

Soustruhy rozlišujeme na soustruhy univerzální, čelní (lícní), svislý (karusel), revolverový, poloautomatické, automatické a speciální.

2. Charakteristika těžkoobrobitelných materiálů

Mezi těžkoobrobitelné materiály patří materiály skupiny ISO – M (korozivzdorné oceli), ISO – H (zušlechtnuté oceli) a ISO – S (žárovzdorné oceli). Větší důraz bude kladen na materiály skupiny ISO – S.

2.1 ISO – M

Korozivzdorné oceli obsahují alespoň 12% chromu, dále obsahují nikl, molybden a další legující prvky. Tyto oceli jsou schopné pasivace. Pasivace umožňuje těmto ocelím odolávat elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Obrobitelnost korozivzdorných ocelí závisí na množství legujících prvků. Typická vlastnost je zvýšená teplota vznikající při jejich obrábění. Kvůli tomu je břit nástroje vystaven vyšším teplotám a dochází k opotřebení ve tvaru vrubu a tvoření nárůstků. Z pohledu obsahu prvků v mikrostruktuře je lze rozdělit do tří základních skupin, kde každá je specifická svými vlastnostmi a použitím. Tyto oceli se rozdělují do tří podskupin a to martenzitické oceli, feritické a austenitické.

Martenzitické oceli

Martenzitické oceli jsou korozivzdorné oceli s přibližně 12-18%Cr a 0,15%C, které po zakalení vykazují martenzitickou strukturu, která může dosahovat až tvrdosti 60 HRC. Oceli mají nižší odolnost proti korozi, vyšší pevnost a tvrdost. Jsou magnetické a v žíhaném stavu lépe obrobitelné.[18]

Feritické oceli

Feritické oceli obsahují více než 13%Cr a méně než 0,1%C. Větší podíl chromu v mikrostruktuře zajišťuje vyšší odolnost proti korozi. Skupiny feritických ocelí mají jemnozrnnou strukturu, jsou feromagnetické, nejsou kalitelné a jejich pevnost je vyšší než u nelegované uhlíkové oceli.[18]

Austenitické oceli

Austenitické oceli obsahují krom Cr další prvky a to zejména Mn, Ni, Mo a popřípadě N. Austenitické oceli mají vysokou tvrdost proti korozi. Austenitické oceli nejsou kalitelné v porovnání martenzitickými oceli, jsou náchylné ke koroznímu praskání, mají sklon k deformačnímu zpevnění a jsou obtížně obrobitelné.[18]

2.2 ISO – H

Do této skupiny jsou řazeny oceli o vyšších tvrdostech (45-65 HRC) a tvrzené litiny (400-600 HB). Jsou to oceli, které mají střední obsah uhlíku. Zušlechtěné oceli jsou pevnější, ale dají se obrábět (soustružit, frézovat). Po kalení se popouštějí za vyšší teploty, aby bylo dosaženo vysoké houževnatosti pro zachování dobré pevnosti. Zušlechtování se skládá ze dvou metod, z běžného kalení a popouštění oceli na vyšší teplotu. Při zušlechtování se zlepšují mechanické vlastnosti, například pevnost v tahu, struktura oceli.[11]

2.3 ISO – S

Žárovzdorné slitiny zahrnují celou řadu vysokolegovaných materiálů na bázi železa, niklu, kobaltu a titanu. Jejich vlastnosti jsou velice podobné jako u materiálů skupiny ISO M, avšak jejich obrábění je mnohem obtížnější a životnost ostří břitových destiček je kratší. Typická vlastnost pro tyto materiály je zpevňování během jejich obrábění, což vede ke značnému opotřebení nástroje a vzniku velkých teplot při obrábění. Vlastnosti při obrábění se u jednotlivých slitin liší v závislosti na použitých legujících prvcích a na průběhu procesu výroby. Proces jako je žíhání a stárnutí výrazně ovlivňuje obrobitelnost. Při umělém stárnutí dochází k precipitačnímu vytvrzování, které pak brání skluzu materiálu a obrábění se stává obtížnějším.[21]



Obr. 4: Použití žáruvzdorných a žárupevných niklových slitin [29]

2.3.1 Slitiny niklu

Slitiny na bázi niklu jsou vytvrditelné materiály. Jsou mnohem hůř obrobitelné, než slitiny na bázi železa nebo titanu. Jejich hlavní složka je nikl o obsahu 30% - 70% a v kombinaci s dalšími legujícími prvky. Slitiny na bázi niklu se během obrábění zpevňují, důsledkem toho jsou vysoké řezné teploty. V případě použití nástrojů ze slinutých karbidů se doporučuje, obrábět slitiny na bázi niklu s nástroji s ostrou geometrií. Při obrábění těchto slitin se tvoří na břitu nástroje nárůstka. Nástroje vhodné pro obrábění niklových slitin by měli mít relativně velký úhel čela (doporučuje se 5 až 15°) a tomu odpovídající úhel hřbetu (6 až 10°). Tyto slitiny se používají v aplikacích, kde je vyžadována vysoká odolnost proti korozi, nebo vysoká pevnost při zvýšených teplotách. Využívají se v leteckém, energetickém a chemickém průmyslu. S ohledem na mechanické složení a strukturu slitiny je můžeme rozdělit na konstrukční, korozivzdorné, žárupevné a žáruvzdorné. Příkladem niklové slitiny je Inconel 718, Hastelloy B, Nimonic 90.[21]

Vhodné řezné materiály pro obrábění niklových slitin

- slinuté karbidy (SK), povlakované metodou PVD (TiN, TiCN, TiN),
- kubický nitrid boru (CBN),
- řezná keramika.

Inconel 718

Inconel 718 je typ superslitiny s vysokým obsahem niklu (Ni). Inconel dále obsahuje velké množství obsahu chrómu (Cr) a dalších legujících prvků, je velmi odolný vůči korozi a využívá se při extrémních teplotách. Tato slitina zachovává vynikající mechanické a chemické vlastnosti při vysokých teplotách. Při zahřátí, Inconel vytvoří na povrchu stabilní vrstvu oxidů, která chrání povrch před dalším útokem. Inconel je dobře tepelně zpracovatelný s možností získání velmi dobrých mechanických vlastností zejména tvrdost a pevnost.[31]

Oblasti použití:

Inconel 718 se uplatňuje v plynových turbínách, při konstrukci pohonného čerpadla, výfukových systémů, tlakových nádob, turbodmychadla, kryty motorů, apod.[31]

Tab. 1: Chemické složení materiálu INCONEL 718 [31]

Inconel 718	Prvek (v % hmotnosti)							
	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Cu
	50-55	17-21	Zůstatek	2,8- 3,3	4,75- 5,5	1	0,35	0,3
	Prvek (v % hmotnosti)							
	Al	Ti	Si	C	S	P	B	Ta
0,2- 0,8	0,65- 1,15	0,35	0,08	0,015	0,015	0,006	0,05	

2.3.2 Slitiny kobaltu

Slitiny na bázi kobaltu se vykazují korozní odolnosti za vysokých teplot a pevnosti až do teploty 1100°C. Mají nejhorší obrobiteľnosť ze superslitin. Mají vysoký obsah Cr, Ni a W. Jejich hlavním složkou je Co. S ohledem na finanční časovou náročnost jsou kobaltové superslitiny využívány jako náhrada niklové slitiny za podmínek nízkých teplot.[21] Dále mají uplatnění v leteckém průmyslu, chemickém, zbrojním průmyslu, automobilovém průmyslu. Ve zbrojním průmyslu se kobaltová slitina objevuje ve formě stelitu jako vnitřní vložka amerických kulometu M60, M240 a M2. Shrnutí využití kobaltových slitin je uvedeno v tab. 2.[30]

Pro obrábění kobaltových slitin se můžeme setkat s doporučenými řeznými rychlostmi $v_c = 30 - 90 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pro karbidové nástroje. Minimální hloubka řezu a_p u soustružení by měla být větší než 0,63 mm a posuv na otáčku f_{ot} větší než 0,12 mm.

Vhodné řezné materiály pro obrábění kobaltových slitin:

- SK třídy K.
- CBN.
- HSS.

Tab. 2: Praktické aplikace kobaltových slitin [vlastní archiv]

Oblast výskytu	Konkrétní případ použití
Letectví	Plynové turbíny
Chemický, petrochemický průmysl	Části čerpadel, ventilů
Sklářský průmysl	Rozvlákňovací hlavy k výrobě skelných vláken, pro skelnou vatu
Automobilový (dopravní) průmysl	Ventily v motorech

Strojírenství	Nástroje k obrábění
Zbrojní průmysl	Vložky hlavní střelných zbraní
Dřevařský průmysl	Pily
Těžební průmysl	Rypadla, dopravníky
Energetika	Části parních turbín (lopatky motoru)
Medicína	Proteika
Elektrotechnika	Magnety pro elektromotory, generátory

2.3.3 Titan a jeho slitiny

Titan

Titan je velmi lehký a tvrdý kov s dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou odolností proti korozi a s nízkou tepelnou a elektrickou vodivostí. Titan se rozděluje do dvou základních alotropických modifikací α, β . Mechanické vlastnosti závisí na obsahu kyslíku, dusíku a uhlíku v jeho struktuře. Titan a jeho slitiny lze využít v širokém spektru průmyslu jako je doprava, letectví, vojenská technika, strojírenství anebo lékařství. Titanové slitiny se také vyznačují nízkou trvanlivostí řezných nástrojů a vysokou řeznou teplotou v místě řezu. Jde o problematiku obrábění těžkoobrobitelných materiálů.[21]



Obr. 5: Blackbird - celotitanová konstrukce [29]

Slitiny titanu

Slitiny titanu dosahují výrazně vyšších pevnostních vlastností ve srovnání s čistým kovem. Slitiny titanu se dělí podle rozpustnosti přísady ve fázi alfa a ve fázi beta:[22]

- 1) Slitiny α mají nízkou měrnou hmotnost, jsou odolné proti křehkému porušení a pevnost dosahuje až do hodnoty 1000 MPa. Mezi prvky, které stabilizují fázi α , patří hliník, dusík, kyslík a uhlík.[22]
- 2) Slitiny β mají vysokou odolnost proti korozi a dobrou tvářitelnost za normální teploty. Jejich pevnost dosahuje hodnot až 1600 MPa. Nevýhodou je vyšší měrná hmotnost než u ostatních titanových slitin a také vysoká cena. Mezi prvky, které stabilizují fázi β , patří molybden, niob, tantal a vanad.[22]
- 3) Slitiny $\alpha + \beta$ (heterogenní) mají horší svařitelnost než slitiny α , ale na druhou stranu mají výborné vlastnosti při teplotě okolí. Vlastnosti těchto fází závisí na poměru fází, množství přísadových prvků a především na tepelném zpracování. Tyto slitiny se používají na lopatky turbín, kompresorů a součásti leteckých podvozků.[22]

Vhodné rezné materiály pro obrábění titanových slitin

- povlakované a nepovlakované slinuté karbidy (WC-Co),
- polykrystalický diamant (PCD),
- polykrystalický nitrid boru (PCBN),
- kubický nitrid boru (CBN).

TiAl6V4

Slitina TiAl6V4 je nejpoužívanější a nejčastěji vyráběnou slitinou titanu. Slitina je označována také jako VT6 a zařazuje se do skupiny slitin s dvoufázovou strukturou $\alpha + \beta$. Jedná se o vysoce pevnou slitinu. Tepelným zpracováním jako je žíhání či zušlechťování lze zvýšit její mechanické vlastnosti, například pevnost o 15 až 25%. Tato slitina je vhodná pro tváření za tepla, ale je možné ji také odlévat. Zpracováním za studena se nedoporučuje, z důvodů její vysoké pevnosti a nízkému modulu elasticity. Příklady jednotlivých typů slitin a jejich chemické složení jsou uvedeny v tab. 3. Tyto slitiny vykazují vynikající únavové vlastnosti, odolnost vůči iniciaci trhliny i jejímu šíření. Slitina TiAl6V4 má velmi dobrou odolnost proti korozi a to i v agresivních prostředích,

další příznivou vlastností je výborná biokompatibilita s lidskou tkání a kostmi, která umožňuje široké použití slitiny v lékařství a také pro výrobu šperků.[32]

Oblasti použití:

- implantáty v chirurgii
- součásti v leteckém průmyslu
- šperkařství
- výroba lodí
- energetika
- vojenský průmysl

Tab. 3: Obsah chemických prvků v jednotlivých typech slitin [32]

	Prvek (v % hmotnosti)							
	Fe	C	N	O	H	Al	V	Ti
TiAl6V4	<0,30	<0,08	<0,05	<0,02	<0,015	5,50-6,75	3,50-4,50	Zůstatek
TiAl6V4 ELI	<0,025	<0,08	<0,05	<0,13	<0,012	5,50-6,50	3,50-4,50	Zůstatek

2.4 Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů

Obrobitelnost je vlastnost, kterou lze definovat jako míru schopnosti daného materiálu být zpracováván technologií obrábění. Závisí na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou fyzikální a mechanické vlastnosti daného materiálu, metoda obrábění, geometrie nástroje. Z fyzikálních vlastností ovlivňuje obrobitelnost zejména tepelná vodivost. Z mechanických vlastností obrobitelnost ovlivňuje zejména pevnost, houževnatost a tvrdost. Čím je materiál pevnější a tvrdší, tím je hůře obrobitelný.

Těžkoobrobitelné materiály jsou vysoce legované materiály a je nutné se v průběhu obrábění vyhnout velkému dynamickému zatížení, odolat vysokému abrazivnímu opotřebení, zajistit chemickou stabilitu a dostatečný odvod tepla z místa řezu. Těžkoobrobitelné materiály vyžadují speciální přístup při volbě parametrů při obrábění, řezných podmínek a nástrojů. Všeobecně je obrobitelnost je ovlivněna pěti základními vlastnostmi těchto materiálů a to: tažností, tvrdostí, tepelnou vodivostí, abrazivností a tendencí k deformačnímu zpevnění. Těžkoobrobitelné materiály mají srovnatelnou tvrdost jako běžné uhlíkové oceli. Mají mnohem vyšší abrazivnost, což je spojena s volbou řezného nástroje a jeho povlaku. Použité povlaky musí být velmi otěruvzdorné

a odolné proti abrazi, aby byla zajištěna životnost řezného nástroje. Těžkoobrobitelné materiály mají vyšší sklon k deformačnímu zpevnění. V průběhu obrábění dojde ke kontaktu nástroje s obrobkem a tak dochází ke vzniku tvrdé vrstvy na povrchu, která způsobuje zatížení břitu nástroje, snížení jeho životnosti. Dále mají těžkoobrobitelné materiály nízkou tepelnou vodivost, která je příčinou vysoké koncentrace tepla v místě řezu. Těžkoobrobitelné materiály mají vysokou tažnost než běžné uhlíkové oceli. Z tohoto důvodu musí být řezné nástroje houževnatější.[15]

2.4.1 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli mají horší obrobitelnost, je to způsobeno hlavně kladenými nároky, mezi které patří odolnost proti korozi a pevnost v tahu. Ta se dá zlepšit přidáním síry do materiálu, ale zhorší odolnost proti působení mechanických sloučenin materiálu. Proto se korozivzdorná ocel popouští, nebo také tahá za studena, zejména austenitické a feritické oceli. Korozivzdorné oceli mají velmi špatnou tepelnou vodivost. Z toho vyplývá, že v místě řezání vzniká vysoká teplota, která je k tomu způsobena velkou tepelnou pohltivostí. Korozivzdorné oceli mají tendenci ke zpevňování za studena, kvůli tomu může vzniknout až extrémní tvrdost obrobenej plochy. Jsou velice náchylné k nalepování na řeznou destičku, což může vést k vyламování řezné hrany nástroje.[15]

2.4.2 Obrobitelnost niklových slitin

Obrobitelnost niklových slitin a niklu je velmi rozmanitou záležitostí. Při obrábění se vytváří opotřebení na hřbetě VBD a také současně žlábek na čele VBD. Při zvýšené řezné rychlosti dochází k velmi strmému poklesu jakosti obrobenej plochy. Dále může dojít k opotřebení ve formě žlábků při nízkých řezných rychlostech, avšak opotřebení špičky nástroje je menší. Velmi důležitou součástí procesu obrábění niklu a niklových slitin je použití mazání nebo chladicí kapaliny. Často se používají oleje, které obsahují síru, protože síra zlepšuje kluzné vlastnosti a také tvorbu třísky.[15]

2.4.3 Obrobitelnost kobaltových slitin

Kobaltové slitiny jsou nejhůře obrobitelné. Jejich hlavní složkou je kobalt, chrom, nikl a wolfram. Vyznačují se vysokou pevností za vysokých teplot a silným sklonem ke zpevnění za studena. Jejich obrobitelnost lze ovlivnit tepelným zpracováním jen velmi málo. Dá se říci, že čím více přísadových prvků, tím je pevnost za tepla vyšší a obrobitelnost horší.[15]

2.4.4 Obrobitelnost titanových slitin

Obrobitelnost titanu je odlišná než obrobitelnost jiných kovů, například u niklu nebo ocelí, protože povrch obrobku je křehký z důvodu přítomnosti kyslíku a dusíku z atmosféry. Nízká tepelná vodivost má za následek nalepování na břit nástroje a tím také jeho rychlejší otupení. Rychlost odběru materiálu a trvanlivost nástroje je menší než například při obrábění ocelí. Na druhé straně, výkon a řezné síly jsou nižší jako například u ocelí nebo niklu. Při obrábění titanu a jeho slitin by se měl používat ostrý pozitivní břit a velký úhel hřbetu. Musí být zajištěny stabilní podmínky, spolehlivé upnutí a optimalizovaný posuv. Další výhodou je také přívod chladicí kapaliny. Měli by se zamezit nárůstu opotřebení a tím udržovat teplotu obrábění. Obrobitelnost titanu lze ovlivnit přínosem uhlíku, dusíku nebo kyslíku. Dochází ke zvýšení teploty na čele nástroje a ke snížení řezné rychlosti. To vede k deformaci řezné hrany a také k vytváření žlábků na čele nástroje.[15]

3. Nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů

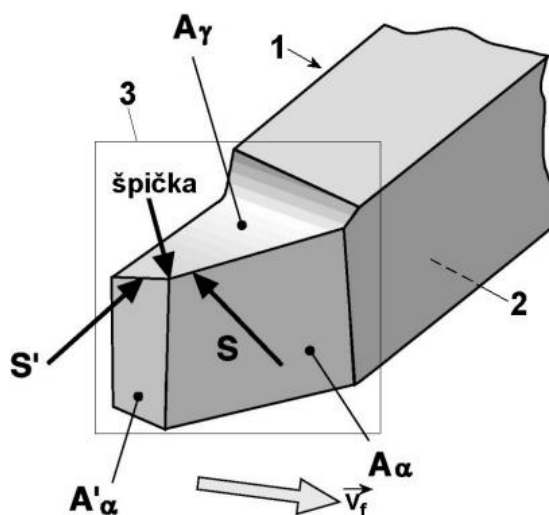
Požadavky na nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů jsou poměrně vysoké. Nástroje musí mít řeznou část zhotovenou z řezného materiálu, který je odolný proti namáhání při vysokých teplotách, proti vzniku plastické deformace a musí mít schopnost odolávat abrazivnímu opotřebení i chemické reakci mezi třískou a řezným materiálem.[2]

3.1 Řezný nástroj

Nástroj je aktivním prvkem v obráběcím procesu. Interakce nástroje s obráběným materiálem umožňuje realizaci řezného procesu. Břit nástroje vniká do materiálu obrobku a odděluje z něho postupně částice ve tvaru třísky.[24] Řezný nástroj se skládá z těchto základních částí:

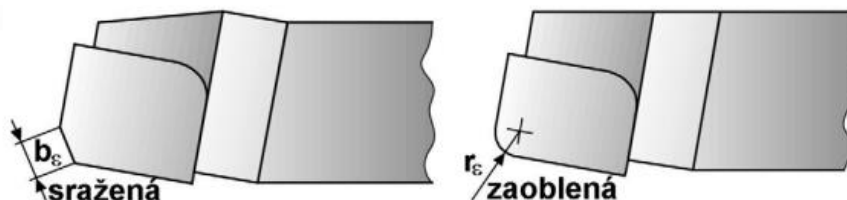
- Řezná část – je funkční část nástroje, který obsahuje prvky tvořící třísku (viz obr. 6, označeno 3).
- Břit – je prvek řezné části nástroje ohraničený čelem a hřbetem.
- Upínací část (stopka) – je část nástroje, která slouží k upínání do obráběcího stroje.

- Plochy na nástroji – se označují symboly, které se skládají z písmene A a z indexu řecké abecedy. Plochy přiřazené k vedlejšímu ostří se označují s čárkou, (např. $A\alpha'$ - vedlejší hřbet).
- Hřbet nástroje $A\alpha$ – je plocha, která při řezném procesu směřuje k ploše obrobku.
- Čelo nástroje $A\gamma$ – je plocha, po které odchází tříska.
- Ostří – je prvek řezné části a je průsečnicí hřbetu a čela.
- Hlavní ostří S – je část ostří, která slouží k vytvoření převodové plochy na obrobku.
- Vedlejší ostří S' – provádí dokončovací operaci na obrobené ploše.



Obr. 6: Části, plochy a ostří na řezné části soustružnického nože [24]

- Špička nástroje (viz obr. 7) – je relativně malá část ostří. Může být přímá (sražená) nebo zaoblená. Nástrojový úhel špičky r_ϵ je zpravidla zvolen v rozsahu od 0,2 mm do 5 mm. Platí zásada, že tím vyšší poloměr špičky, tím je možno využít vyšší posuvové rychlosti nástroje při zvýšené trvanlivosti nástroje.



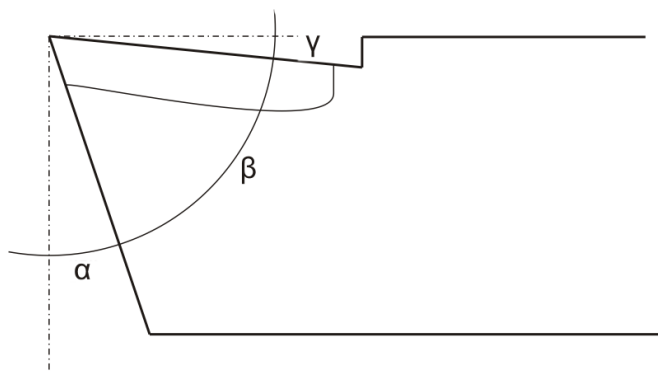
Obr. 7: Špička nástroje [24]

3.2 Geometrie řezného nástroje

Geometrie řezného nástroje má značný vliv na velikost síly a její rozložení do jednotlivých složek, na utváření a odvod třísky, drsnost, přesnost a kvalitu výsledné obrobeneé plochy, trvanlivost břitu a hospodárnost obráběcího procesu.[24]

Na obr. 8. je vidět nákres břitu se třemi nástrojovými úhly:

- Úhel hřbetu α – tento úhel ovlivňuje velikost tření nástroje o obrobek, poměry velikosti složek síly řezání, vznik tepla třením, tuhost břitu a trvanlivost nástroje. Optimální hodnota úhlu se volí v rozmezí od $+8^\circ$ do $+12^\circ$.
- Úhel břitu β – při konstrukci a používání se tento úhel neuvádí, ačkoli je základním úhlem každého nástroje. Čím je tento úhel větší, tím větší je odpor při oddělování třísky. Podle toho by měl být úhel břitu co nejmenší. Malým úhlem břitu by se zmenšila jeho pevnost a tuhost. Velikost úhlu břitu je dána velikostí úhlu hřbetu a úhlu čela.
- Úhel čela γ – hodnota úhlu se projevuje na utváření třísek, poměry velikosti složek síly řezání i opotřebením nástroje. Současně s úhlem hřbetu působí i na tuhost a pevnost břitu nástroje. Optimální úhel čela se pohybuje v rozmezí od -8° do $+8^\circ$.



Obr. 8: Nákres břitu [vlastní archiv]

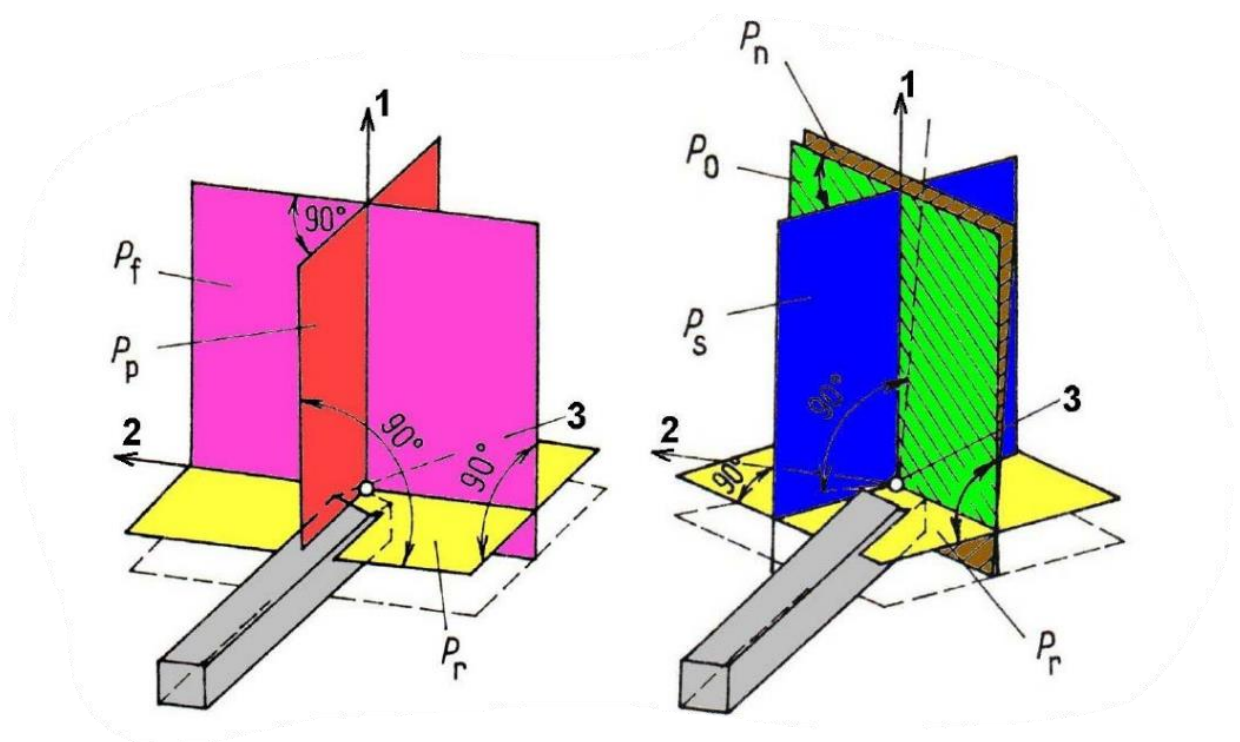
Pro řezné nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů se doporučuje používat ostrý pozitivní břit a velký úhel hřbetu. Zaoblení špičky by mělo být co nejmenší, doporučuje se od 0,2 mm do 1,2 mm.

3.2.1 Nástrojové roviny

- Nástrojová rovina základní P_r – rovina, která prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na předpokládaný směr hlavního řezného pohybu.

- Nástrojová rovina boční P_f – rovina téže procházející uvažovaným bodem ostří, leží v ní vektor posuvového pohybu v_f a je kolmá na rovinu P_r .
- Nástrojová rovina zadní P_p – rovina, která prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r a na nástrojovou rovinu boční P_f .
- Nástrojová rovina ostří P_s – rovina tečná k ostří v uvažovaném bodě ostří a je kolmá na rovinu základní P_r .
- Nástrojová rovina ortogonální P_o – rovina procházející uvažovaným bodem ostří a je kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r a na nástrojovou rovinu ostří P_s .
- Nástrojová rovina normálová P_n – rovina kolmá na ostří S v uvažovaném bodě ostří a není kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r .

Na obr. 9 jsou vyobrazeny výše uvedené nástrojové roviny, kde předpokládaný směr vektoru hlavního řezného pohybu je označen číslem 1, směr posuvového pohybu označen 2 a uvažovaný bod ostří označen číslem 3.[24]



Obr. 9: Roviny nástrojové souřadné soustavy soustružnického nože [24]

3.3 Řezné podmínky

Volba optimálních řezných podmínek je nezbytnou součástí každého obráběcího procesu. Při volbě řezných podmínek jsou rozhodující kritéria: řezná rychlost, posuv a šířky záběru ostří. Při vypracování výrobního postupu se snažíme zvolit optimální řezné podmínky pro

obrábění těžkoobrobitelných materiálů a pro požadované výsledky obrábění. Optimální řezné podmínky jsou takové podmínky, při kterých se dosáhne nejnižších výrobních nákladů při nejnižším možném výrobním čase.

Řezné podmínky při soustružení volíme tak, že z celkového přídatku na obrábění nejprve stanovíme hloubku řezu (přídavek odebíráme pokud možno na jednu třísku) poté stanovíme hodnotu posuvu a řeznou rychlost.[23]

3.3.1 Hloubka řezu (a_p)

Hloubka řezu je omezena délkou ostří nože (v záběru by neměly být více jak 2/3 délky ostří), ale také výkonem a tuhostí stroje. Šířka záběru ostří se obvykle pohybuje v rozsahu $a_p = 0,5$ až 30 mm. Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů se volí malé hodnoty hloubky řezu.[23]

3.3.2 Posuv (f)

Velikost posuvu závisí na požadované jakosti povrchu a je také ovlivněna geometrií břitu, výkonem a tuhostí stroje. Posuv by se měl volit tak, aby vyhovoval uvedeným kritériím. Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů se posuv pohybuje v rozsahu $f = 0,1$ až 2 mm/ot. Pro rychlost posuvu v_f platí následující vztah:[23]

$$v_f = f \cdot n \text{ [mm/min]}$$

(3.1)

f ... posuv [mm/ot.]

n ... počet otáček [ot./min]

3.3.3 Řezná rychlost (v_c)

Řezné rychlosti pro soustružení jsou závislé zejména na druhu obráběného materiálu, na způsobu obrábění a na druhu nástrojového materiálu. Řezná rychlost pro konvenční metody obrábění se pohybuje v rozsahu $v_c = 10$ až 600 m/min, při obrábění Al slitin lze dosáhnout $v_c = 1000$ m/min i více. Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů výrobci doporučují zpravidla nižší řezné rychlost $v_c = 40$ až 60 m/min.[23]

Řezná rychlost pro soustružení válcových ploch:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m/min]$$

(3. 2)

D ... výchozí obráběný průměr [m]

n ... frekvence otáček obrobku [ot./min]

Poznámka: Pro obrábění kobaltových slitin se můžeme setkat s doporučenými řeznými rychlostmi $v_c = 30 - 90 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pro karbidové nástroje. Minimální hloubka řezu a_p u soustružení by měla být větší než 0,63 mm a posuv na otáčku f_{ot} větší než 0,12 mm.

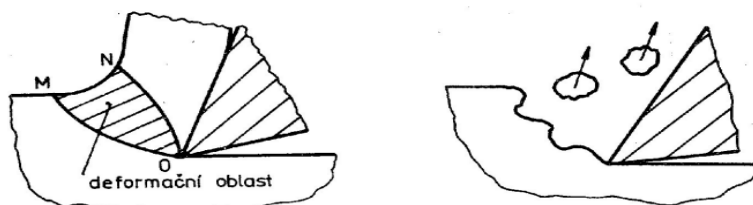
3.4 Mechanismus tvorby třísky

Při obrábění je z obrobku odebírán materiál ve formě třísky. Tříška vzniká vnikáním břitu nástroje do obráběného materiálu. Třísku dělíme na tvářenou a netvářenou. Tvářená tříška je charakteristická tím, že při jejím odebírání dochází v obráběném materiálu k plastické deformaci. Tvářená tříška je specifická pro převážnou většinu materiálu užívaných ve strojírenství. Tříška netvářená vzniká např. při obrábění keramiky, dřeva a některých plastů

a při jejím odebírání nedochází k plastické deformaci.[10]

Na obr. 10 je znázorněna tvorba obou druhů třísky, u třísky tvářené je zobrazena oblast, v níž dochází ke vzniku plastických deformací před břitem řezného nástroje. Konkrétně se jedná o oblast primární plastické deformace, kde se materiál prvotně deformuje. Tato deformace předchází vzniku jednotlivých elementů třísky.[10]

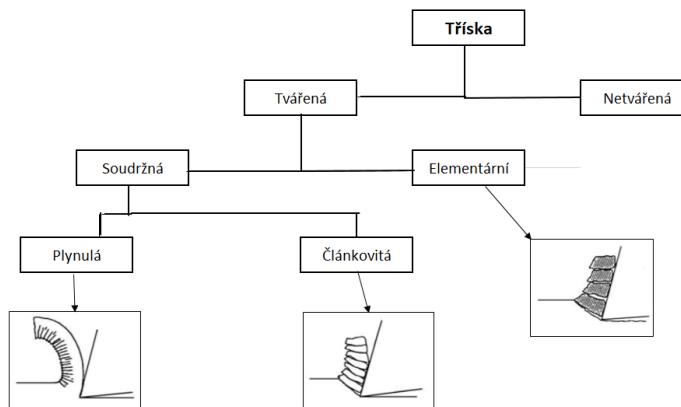
V dalších kapitolách je řešena pouze problematika třísky tvářené, tříška netvářená se ve strojírenství vyskytuje pouze okrajově.



Obr. 10: Vznik třísky tvářené (vlevo) a třísky netvářené (vpravo) [10]

3.4.1 Druhy třísek

Tříska tvářená se rozděluje podle schématu (obr. 11) na třísku soudržnou a elementární. Soudržná tříska se dále dělí na třísku plynulou a článkovitou.[10]

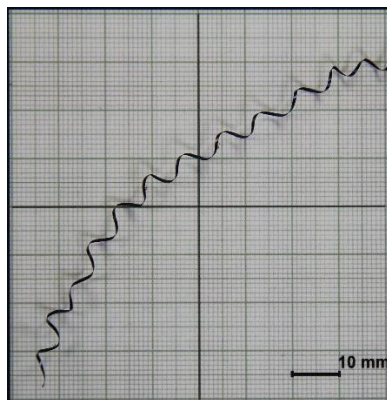


Obr. 11: Rozdělení třísek [10]

Tvar třísky je ovlivněn vlastnostmi obráběného materiálu. Největší vliv má plasticita obráběného materiálu v oblasti těsně před břitem (obr. 10), ve které se obráběný materiál plasticky deformuje. Plasticita této oblasti je ovlivněna chemickým složením materiálu a jeho krystalickou stavbou. Dále také podmínkami plastické deformace, tj. teplotou, stavem napjatosti a deformační rychlosti. Další faktory ovlivňující tvar třísky jsou: řezné podmínky (řezná rychlost, posuv a hloubka řezu), řezné prostředí a geometrie břitu řezného nástroje.

Tříska plynulá

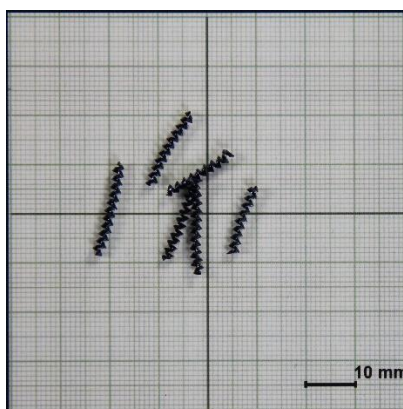
Tento druh třísky vzniká, pokud při kluzu nedojde prakticky k porušení materiálu a soudržnost částí materiálu je vysoká. Je charakteristická tím, že se nedělí a z místa obrábění odchází plynule. Při obrábění je tato tříska nežádoucí, neboť velmi rychle zaplňuje pracovní prostor, obtížně se s ní manipuluje a hrozí namotání třísky na funkční prvky stroje a na nástroj. Může také zabránit automatické výměně nástroje, či dokonce způsobit destrukci břitu. Vznik této třísky se eliminuje volbou vhodného řezného prostředí a řezných podmínek v kombinaci s prvkem na nástroji, který se nazývá utvařec třísky.[10]



Obr. 12: Plynulá tříška – fotografie

Tříška článkovitá

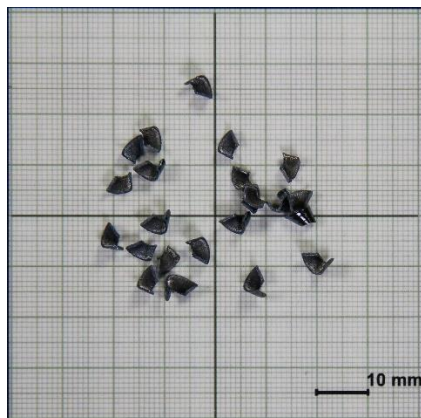
Tvoří pomyslný přechod mezi třískou plynulou a elementární. Při její tvorbě dochází ke kluzu na hranici NO deformace a soudržnost jednotlivých elementů je částečně porušena. K porušení soudržnosti mezi jednotlivými elementy třísky dochází při jejím odchodu z místa řezu. Příčinou porušení soudržnosti je chladnutí třísky, její vlastní hmotnost nebo kontakt třísky s částí ze systému obrobek-nástroj-stroj. Dle tvaru a velikosti článků se určuje, zda je tříška přípustná pro obrábění, či nikoliv.[10]



Obr. 13: Článkovitá tříška – fotografie

Tříška elementární

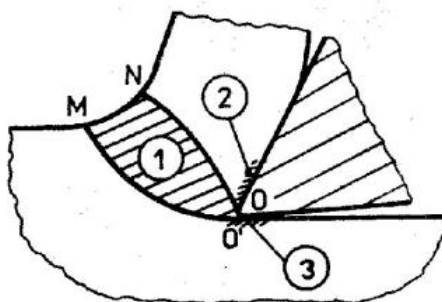
Vzniká při porušení kohezní pevnosti na hranici NO plastické deformace během kluzu. Tříška má podobu malých elementů, které při jejich vzniku odletují z místa řezu. Z praktického hlediska je tento druh třísky velice výhodný, protože zaujímá malý objem a na řezný proces nemá žádný negativní účinek. Elementární tříška vzniká například při obrábění litin a bronzu.[10]



Obr. 14: Elementární třísky – fotografie

3.4.2 Vznik tvářené třísky

Jak již bylo zmíněno, vznik tvářené třísky je doprovázen plastickou deformací. K plastické deformaci dochází ve třech oblastech. Oblasti dělíme na primární, sekundární a terciální.[10] Tyto oblasti jsou viditelné na obr. 15. Z hlediska napjatosti při obrábění dělíme řezání na ortogonální (dvouosá napjatost) a vázané (trojosá napjatost).



Obr. 15: Oblasti plastické deformace, 1 - primární, 2 - sekundární, 3 - terciální [10]

MO je hranice, na které začíná primární plastická deformace. NO, případně NO' je hranicí konce primární plastické deformace a dochází na ní ke kluzu. Uvažujeme dvouosou napjatost, při které působí maximální hlavní napětí ve směru kolmém na volný povrch. Maximální tečné napětí působí pod úhlem 45° , v rovinách s maximálním tečným napětím je největší pravděpodobnost, že dojde ke kluzu [10].

V oblasti primární plastické deformace bezprostředně u ostří břitu působí plastická deformace a deformační rychlost s největší intenzitou. To způsobí, že největší pevnost materiálu je u ostří břitu, touto oblastí je výrazně ovlivněn řezný odpor, neboť z této části oblasti primární plastické deformace pochází velké množství řezného odporu [10].

3.4.3 Tvorba třísky při obrábění těžkoobrobitelných materiálů

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů skupiny ISO - S, vzhledem ke své nízké tepelné vodivosti, dochází k vysoké koncentraci tepla v místě řezu. To může mít za následek strukturální změny a fázové transformace v třísece. Pro těžkoobrobitelné materiály skupiny

ISO – S platí utváření segmentovaných třísek, viz obr. 16, pro které je velikost plastické deformace v objemu poměrně malá. Úzké oblasti mezi segmenty (smykový pás) se vyznačují vysokou plastickou deformací smykem. Příčinou vzniku jsou smykové nestability deformace, způsobené špatnou tepelnou vodivostí materiálu.[26]

Tvorba segmentů třísky začíná počátečním kontaktem nože s tvořícím segmentem, který je značně krátký a délka styku kontaktu roste s pohybem nože. Dochází k intenzivnímu přenosu tepla do kontaktní zóny nože, což velmi často zapříčiňuje k urychlení opotřebení nože. Při postupném stlačování vytvářeného elementu třísky se celý segment tlačí směrem nahoru.[26]



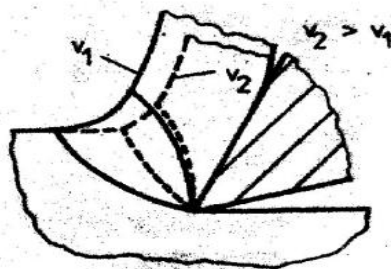
Obr. 16: Tvorba segmentované třísky během obrábění titanové slitiny [26]

3.4.4 Faktory ovlivňující oblast primární plastické deformace

Existuje mnoho faktorů, které přímo, či nepřímo ovlivňují oblast primární plastické deformace. Mezi hlavní skupiny činitelů ovlivňující oblast primární plastické deformace řadíme: mechanické vlastnosti obráběného materiálu, řezné podmínky, geometrie řezného břitu a řezné prostředí. V následujících odstavcích jsou uvedené některé příklady.[10]

Vliv řezné rychlosti

Pokud zvýšíme řeznou rychlost, oblast primární deformace se zmenší a natočí směrem k čelu břitu nástroje, (viz obr. 17). Zároveň dojde ke snížení měrného řezného odporu, poměrného kluzu a součinitele pěchování.[10]



Obr. 17: Vliv řezné rychlosti na oblast primární plastické deformace [10]

Vliv tloušťky odřezávané vrstvy

Pokud zmenšíme tloušťku odřezávané vrstvy, oblast primární plastické deformace se rozšíří

a natočí směrem do obráběného materiálu. Toto je způsobeno tím, že největší zpevnění, které plyne z největší plastické deformace, je bezprostředně u ostří. Stejně chování oblasti primární plastické deformace platí i pro snížení posuvu. Rozšíření oblasti primární plastické deformace způsobí zvětšení měrného řezného odporu, poměrného kluzu a součinitele pěchování.[10]

Vliv řezného prostředí

Řezné prostředí ovlivňuje oblast primární plastické deformace svými účinky. Konkrétně se jedná o účinek mazací, chladící a řezací. Mazací účinek ovlivňuje třecí složky sil na čele

a hřbetu břitu. Chladící účinek mění mechanické vlastnosti obráběného materiálu. Řezací účinek napomáhá vnikání břitu nástroje do obráběného materiálu. Tato skutečnost je způsobena vhodným chemickým složením řezného prostředí v kombinaci s tlakem a směrem přívodu procesního média. Jednotlivé účinky řezného prostředí jsou podrobněji rozebrány v kapitole 3.9.

3.4.5 Oblast sekundární plastické deformace

Poté, co materiál projde oblastí primární plastické deformace, začnou na spodní straně třísky vznikat sekundární plastické deformace. Vlivem vysokých teplot dojde k odpevnění materiálu na spodní straně třísky a tím je umožněn vznik sekundární plastické deformace. Oblast sekundární plastické deformace je ovlivněna charakterem styku mezi nástrojem a obrobkem. Tento charakter je nejvíce závislý na rozložení napětí (normálových a smykových) a na teplotě styčných ploch. Dělíme ho na bodový a plošný.[10]

Bodový styk

K bodovému styku mezi nástrojem a třískou / obrobkem dochází při menších mechanických a tepelných zatíženích obráběného materiálu. Ke kontaktu břitu nástroje s obráběným materiálem dochází na vrcholcích mikro-nerovností stýkajících se povrchů. K dosažení bodového styku je potřeba volit nižší řezné podmínky, především nízkou řeznou rychlost.[10]

Plošný styk

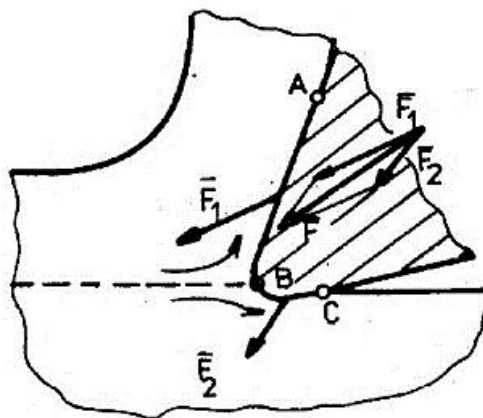
K plošnému styku dochází při vyšším mechanickém, a především tepelném zatížení na spodní hraně třísky. Obdobně jako bodový styk je ovlivněn řeznými podmínkami, hlavně řeznou rychlostí. Čím vyšší jsou řezné podmínky, tím spíše dojde k plošnému styku. Během plošného styku vzniká na spodní straně třísky tekoucí vrstva, jejíž rychlost se mění od nuly do rychlosti odchodu třísky z místa řezu.[10]

3.5 Silové jevy při obrábění

Obráběný materiál klade vůči vnikání břitu řezného nástroje řezný odpor (\bar{R}). Pro překonání řezného odporu je potřeba vyvodit sílu, jejíž velikost bude větší než velikost řezného odporu. Tuto sílu nazýváme silou řeznou (\bar{F}). Je-li splněna podmínka velikosti sil ($\bar{F} > \bar{R}$), dochází k odbírání materiálu v podobě třísky, hovoříme tedy o řezání. Řezná síla je časově proměnná veličina a její okamžitá velikost při obrábění osciluje kolem své střední velikosti (F). Její kolísání se objevuje i při konstantních řezných podmínkách. Tento jev je způsobem drsností obráběné plochy, disperzí mechanických vlastností obráběného materiálu a problematikou mechaniky tvorby třísky. Rozptyl řezné síly ΔF

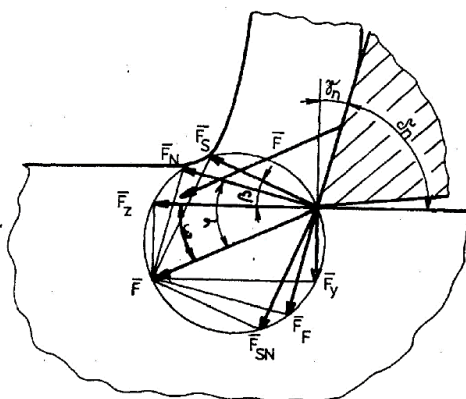
je dán rozdílem maximální a minimální hodnoty řezné síly. Hodnota rozptylu se pohybuje v řádech jednotek až nižších desítek procent velikosti řezné síly F . [10] Řezná síla \bar{F} je výslednicí dvou složek, (viz obr. 18):

- Aktivní složky- \bar{F}_1
- Pasivní složky- \bar{F}_2



Obr. 18: Rozklad řezné síly na aktivní a pasivní složky [10]

V oblasti styku třísky s čelem obráběného nástroje (A-B) působí aktivní složka řezné síly (\bar{F}_1). Pasivní složka řezné síly (\bar{F}_2) působí v oblasti styku hřbetu nástroje s plochou řezu (B-C). V místě B dochází k oddělování obráběného materiálu. Řezná síla \bar{F} i její zmiňované složky se dále rozkládají. Konkrétně se působiště síly F posune do vrcholu ostří nástroje. Tím dosáhneme toho, že vrcholy vektorů jednotlivých složek řezné síly \bar{F} leží na jedné kružnici. Rozklad síly na složky při ortogonálním řezání je zobrazen na obr. 19. [10]



Obr. 19: Rozklad síly při ortogonálním řezání [10]

Kde:

\bar{F} je výsledná řezná síla

\bar{F}_S je složka řezné síly působící ve střižné rovině

\bar{F}_N je normálová složka řezné síly, která je kolmá na rovinu čela

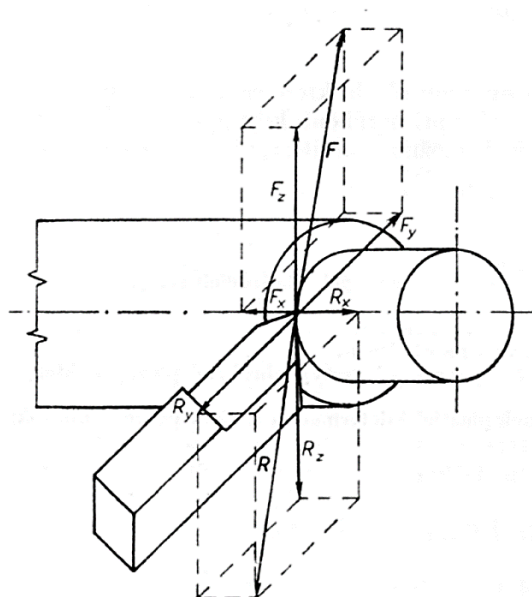
\bar{F}_Z je tangenciální složka řezné síly

\bar{F}_{SN} je normálová složka řezné síly, která je kolmá na střižnou rovinu

\bar{F}_F je tečná složka řezné síly, ležící v rovině čela

\bar{F}_Y je radiální složka řezné síly

Ortogonální řezání nastává, pokud je ostří kolmé na směr řezného pohybu. Ve strojírenské praxi se jedná například o zapichování, protahování a hoblování. Ve většině případů nastává řezání vázané, které je specifické tím, že řezná síla má obecný směr. Řeznou sílu \bar{F} rozkládáme do složek $\bar{F}_x, \bar{F}_y, \bar{F}_z$. Směry těchto sil jsou zobrazeny na obr. 20. Tangenciální složka řezné síly (\bar{F}_z) působí ve směru hlavního řezného pohybu, radiální složka řezné síly (\bar{F}_y) působí v radiálním směru kolmém k ose obrobku a axiální složka řezné síly (\bar{F}_x) působí v axiálním směru osy obrobku [1]. Složky řezných sil jsou na sebe kolmé a sčítáme je dle Pythagorovy věty. Axiální složka řezné síly (\bar{F}_x) bývá označována také jako F_t , neboli posuvová síla. Dle této síly jsou dimenzovány posuvové mechanismy strojů a na samotný proces obrábění má nejmenší význam. Radiální složka řezné síly, rovněž označována jako pasivní složka řezné síly (F_p) je pohlcována tuhostí sestavy stroj-nástroj-obrobek a tím vyvolává deformace tohoto systému. V kombinaci s tangenciální složkou řezné síly způsobuje chvění při obrábění, které způsobí délkové a geometrické nepřesnosti výroby. Tangenciální složka řezné síly má na obráběcí proces největší vliv, protože se dle ní určuje efektivní výkon obrábění a vhodné řezné podmínky. V odborné literatuře bývá nazývána přímo silou řeznou a označována jako F_c . Poměr velikostí složek sil je určen technologií a geometrií nástrojů. Například při soustružení můžeme jednotlivé složky ovlivnit úhlem nastavení hlavního ostří (κ_r).[5][10]



Obr. 20: Síly při vázaném řezání [10]

3.5.1 Měrná řezná síla

„Měrná řezná síla neboli měrný řezný odpor je velikost tangenciální složky řezné síly vztážená na 1 mm^2 odřezávané vrstvy“.[10] Měrná řezná síla je ovlivněna mnoha faktory, jde například o: vlastnosti obráběného materiálu, úhel nastavení nástroje, tloušťku odřezávané vrstvy, řezné rychlosti, poloměr špičky nástroje, řezné prostředí atd. Při znalosti měrné řezné síly/měrného řezného odporu pro daný druh obrábění a průřezu odřezávané vrstvy S jsme schopni určit velikost řezné síly/řezného odporu. Vzhledem k množství činitelů ovlivňující měrnou řeznou sílu je tato síla stanovována experimentálně.[10]

3.6 Teplo a teplota řezání

3.6.1 Teplo při obrábění

Ke vzniku tepla při obrábění dochází transformací vynaložené práce. V teplo se přeměňuje téměř veškerá práce vynaložená na řezání s výjimkou práce potřebné na pružné deformace a práce spotřebované na deformaci mřížky kovu a vytvoření nových povrchů. Při obrábění se cca 98% práce řezání se přemění v teplo.

Teplo řezného procesu Q_e vzniklé při odebrání určitého množství materiálu je přibližně rovné práci řezného procesu E_e , takže $Q_e \approx E_e$. Celková energie Q pak sestává z několika z dílčích složek.[2]

$$Q = Q_{Sh} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} + Q_{Ch} = E_e \text{ [W]}$$

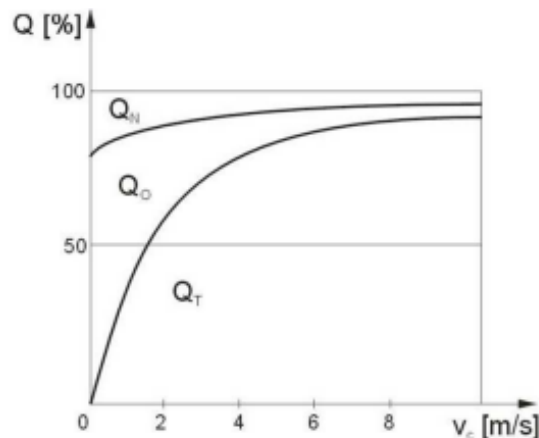
(3.3)

- Q_{Sh} – je teplo způsobené plastickou deformací ve smykové rovině.
- Q_{γ} – je teplo způsobené třením mezi třískou a čelem nástroje.
- Q_{α} – je teplo způsobené třením mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje.
- Q_{Ch} – je teplo způsobené utvářením a dělením třísky.

Z obr. 21 je vidět, že se zvyšující se řeznou rychlostí v_c [m/s] roste i procentuální podíl tepla Q [%]. Kde složky teplot:

- Q_T – je teplo vzniklé v třísce.
- Q_o – je teplo vzniklé v obráběném materiálu.
- Q_N – je teplo vzniklé v řezném nástroji.

Jednotky řezné rychlosti byly doposud v m/min, ale pro lepší znázornění růstu procentuálního podílu tepla je na obr. řezná rychlost v jednotkách m/s.



Obr. 21: Teplo třísky, obrodku a břítu nástroje v závislosti na řezné rychlosti [6]

Při obtížných záběrových podmínkách, například vrtání hlubokých děr, zapichování, při použití řezného prostředí s intenzivním chladícím účinkem, při obrábění s předehřevem obrodku apod. se podíl jednotlivých složek odvedeného tepla může od tohoto průběhu lišit.

Rozhodující složkou tepla z hlediska opotřebení nástroje je složka Q_N . [10]

3.6.2 Teplota řezání

Teplotou řezání obvykle rozumíme střední teplotou stykových ploch mezi břitem nástroje a obrobkem. Teplota řezání je jednou z nejdůležitějších veličin v teorii obrábění, se zřetelem na to, že má rozhodující vliv na trvanlivost nástroje, tedy i na optimální řezné podmínky. Teplotu řezání ovlivňuje řada činitelů. Největší vliv na teplotu řezání má řezná rychlost.[10]

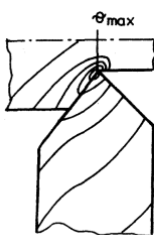
Z hlediska opotřebení nástroje nás zajímají jak maximální teploty na čele a na hřbetu, tak i rozložení teplot na těchto plochách. Stanovení teplotního pole čela a hřbetu je experimentálně velmi náročné. Proto se často spokojíme jen se stanovením středních teplot na těchto plochách. V teorii obrábění je střední teplota označována jako θ . [10]

Pro měření teploty lze využít celou řadu fyzikálních nebo chemických jevů. Nejčastěji se využívají tyto metody:

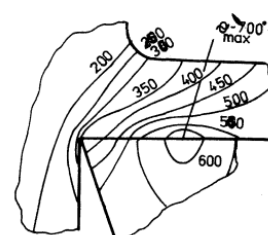
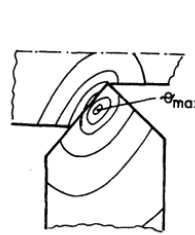
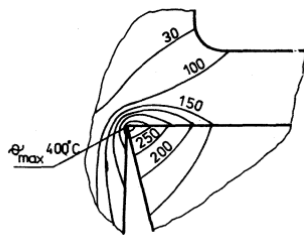
- termoelektrický jev (termočlánky),
- změna elektrického odporu (termistory),
- tepelné záření (fotometrie, termovize),
- změna struktury (teploměrné křídý a barvy).

3.6.3 Teplotní pole nástroje a obrobku

Teplota v jednotlivých místech obrobku a nástroje v oblasti tvoření třísky se mění v závislosti na vzniku teplota a odvodu tepla z místa jeho vzniku. Může být rozložena v zásadě dvěma způsoby. V prvním případě maximální teplota je na ostří, viz např. obr. 23. V těchto případech obrábění, je velikost řezné rychlosti relativně nízká. V druhém případě je maximální teplota v určité vzdálenosti od ostří, viz např. obr. 22. V těchto případech je velikost řezné rychlosti vysoká. Tvorbu tohoto teplotního pole podporuje i posuv. Dále v obr. 8 vidíme, že teplota řezu není v celém nástroji, tříске nebo obrobku konstantní. [10]



Obr. 23: Max. teplota na ostří nástroje [10]



Obr. 22: Max. teplota v určité vzdálenosti ostří [10]

3.7 Trvanlivost nástroje

Trvanlivost lze pospat jako dobu, po kterou je nástroj schopen efektivně plnit stanovené úkoly, popsané příslušnými parametry. Trvanlivost nástroje, podobně jako opotřebení nástroje, závisí zejména na metodě obrábění, vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách (řezná a posuvová rychlost, šířka záběru ostří, řezné prostředí). Z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv řezná rychlost.[24] Základní vztah pro trvanlivost " $T - v_c$ závislost":

$$T = \frac{c_T}{v_c^m} [\text{min}]$$

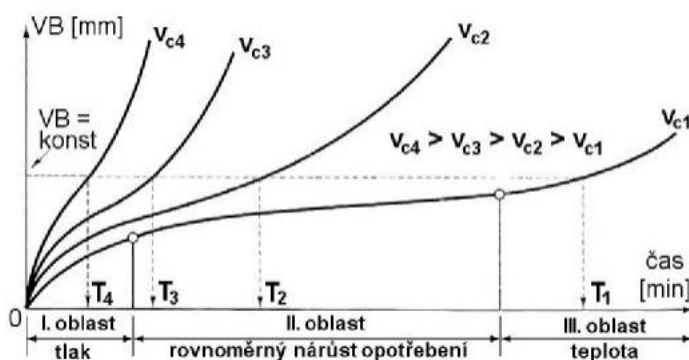
(3.4)

$c_T [-]$... konstanta

$v_c \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right]$... řezná rychlost

$m [-]$... exponent (mára závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti)

Postup při stanovování základní $T-v_c$ závislosti pro konkrétní kombinaci řezný nástroj - obráběný materiál vychází z definice trvanlivosti. Za ostatních konstantních řezných podmínek je daný materiál obráběn daným nástrojem minimálně při čtyřech různých řezných rychlostech, přičemž se sleduje časový nárůst opotřebení nástroje (např. VB), který se vynáší do závislosti $VB=f(t)$, (viz obr. 24).[24]

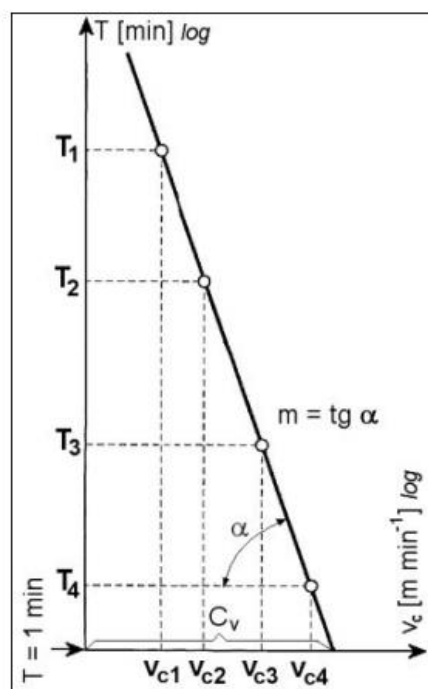


Obr. 24: Závislost opotřebení na čase při různých řezných rychlostech [24]

Pro předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (např. $VB = \text{konst.} = 0,3 \text{ mm}$) jsou z časových křivek VB odečteny hodnoty trvanlivosti T_1 , T_2 , T_3 a T_4 které odpovídají zvoleným řezným rychlostem vc_1 , vc_2 , vc_3 a vc_4 . Body o souřadnicích vc_1-T_1 , vc_2-T_2 , vc_3-T_3 a vc_4-T_4 jsou pak vyneseny do diagramu s logaritmickými souřadnicemi T a vc ,

kde vytvoří přímkou, která odpovídá zvolené hodnotě VB (obr. 25).[24] Nevýhodou uvedených základních vztahů T-vc závislosti je omezení následujícími podmínkami:

- hloubka řezu $a_p = konst.$,
- posuv na otáčku $f = konst.$,
- opotřebení VB = konst.



Obr. 25: Zlogaritmovaný diagram T-vc [24]

V praxi jsou často používány rozšířené vztahy pro T-vc závislost ve tvaru:

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}}$$

(3. 5)

$v_{cT} \left[\frac{m}{min} \right]$... řezná rychlost při konstantní trvanlivosti T

$C_{vT} [-]$... konstanta

$x_v [-]$... exponent, vyjadřující vliv hloubky řezu

$y_v [-]$... exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku

3.8 Řezné prostředí

Fyzikální a chemické vlastnosti prostředí, ve kterém probíhá řezný proces, mohou výrazně ovlivnit primární a sekundární plastickou deformaci třísky, teplotu řezání a řezný odpor, trvanlivost nástroje, přesnost a jakost obrobené plochy. Vhodným řezným prostředím lze obvykle zvýšit hospodárny úběr o 50 až 200% v porovnání s prací za sucha, prodloužit trvanlivost a životnost řezných nástrojů, zvýšit kvalitu obrobené plochy. Řezné prostředí vytváří nejčastěji kapaliny, procesní pasty, olejová mlha nebo plyn.[2]

3.8.1 Vodní roztoky

Roztoky na vodní bázi jsou nejlevnější řezné kapaliny. Přidávají se přísady proti korozi, změkčování, proti pěnivosti. Vodní roztoky mají dobré chladicí a čistící účinky, ale téměř žádný mazací účinek.[3]

3.8.2 Emulzní kapaliny

Emulzní kapalinu tvoří dvě nerozpustné kapaliny, např. olej a voda. Do těchto kapalin je přidáván tzv. emulgátor, který snižuje mezi povrchové napětí. Chladicí účinek emulzní kapaliny je závislý na koncentraci emulze, s jejím nárůstem klesá.[3]

3.8.3 Řezné oleje

Řezné oleje jsou procesní kapaliny na bázi minerálních olejů, které zajišťují převážně mazací účinek. Tyto oleje se nemísí s vodou. Řezný olej má dvě hlavní složky, první složkou je minerální/syntetická olej a složkou druhou jsou aditiva, která zajišťují odolnost proti korozi, tvorbě mlhy a pění. [3]



Obr. 27: Chlazení olejem při odvalovacím frézování [7]



Obr. 26: Chlazení emulzní kapalinou při frézování [8]

3.9 Opotřebení řezných nástrojů

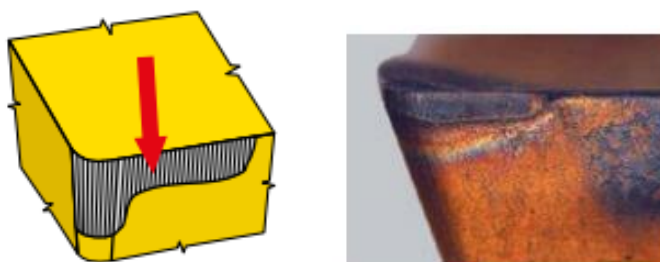
V průběhu obrábění dochází u nástroje k opotřebování, otupování jeho funkčních ploch. Opotřebování se projevuje postupnou změnou pracovních ploch břitu. K opotřebení břitu řezného nástroje dochází v důsledku působení řady činitelů. Především je břit vystaven vysokým teplotám na stykových plochách, které mohou dosáhnout teploty tavení obráběného materiálu. Opotřebení břitu ovlivňuje též charakter styku nástroje a obrobku. Řezné nástroje jsou vystaveny různým formám mechanismů opotřebením, například abraze, adheze, únava a eroze, chemické.[10]

Opotřebení řezného nástroje závisí na faktorech:

- Řezné geometrii
- Řezné rychlosti a posuvu
- Řezným prostředím
- Řezných sil a teplotě
- Vlastností řezného nástroje a materiál obrobku
- Vlastností maziv a procesních kapalin

Opotřebení na hřbetu nástroje

Opotřebení na hřbetu nástroje se zařazuje mezi abrazivní formy opotřebením. Vzniká v místě styku nástroje a obráběného materiálu a v průběhu procesu. Na tvar a umístění oxidační rýhy má vliv velikost posuvu. Při velkém opotřebení hřbetu může nastat zhoršení jakosti obrobku, nepřesnost rozměrů a narůstání tření.[28]

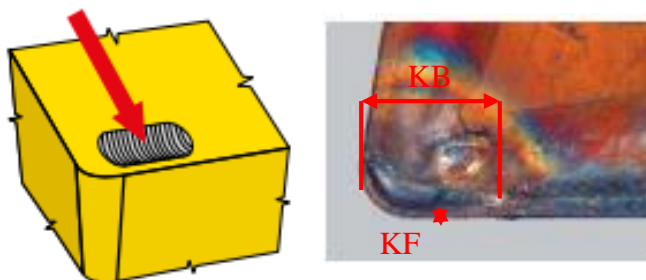


Obr. 28: Opotřebení hřbetu nástroje [28]

Výmol na čele

Opotřebení ve tvaru žlábků na čele je způsobeno vlivem působení mechanismů difúzního opotřebením a abraze. Tento druh opotřebením se nejčastěji projevuje u VBD s rovným čelem, ale také při obrábění měkkých materiálů, kde v tomto případě je výmol širší a

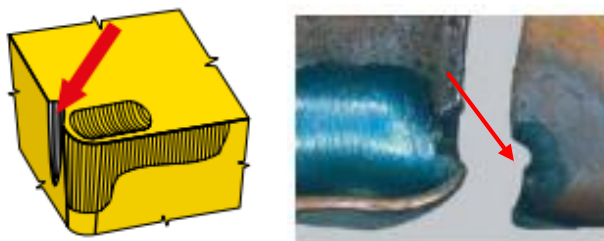
mělčí. U tvrdých materiálů je naopak úzký a hluboký. Při velkém opotřebení ve tvaru žlábků může změnit geometrii břitu a ovlivnit tak tvar třísky, změnit směr působení síly řezání a dojde k zeslabení břitu. Označení KB na obr. 29 značí šířku žlábků a KF vyznačuje vzdálenost žlábků od hrany přechodu mezi čelem a hřbetem. Rozměry jsou v mikrometrech. [28]



Obr. 29: Výmol na čele [28]

Oxidační rýha na vedlejším břitu

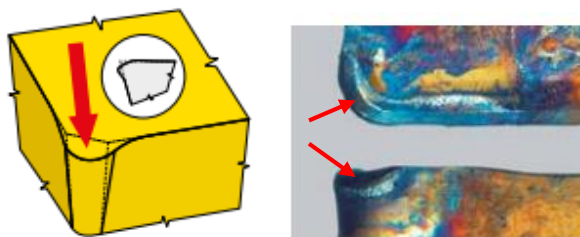
Patří mezi nejvýznamnější kritéria limitující životnost VBD. Tento druh opotřebení se objevuje zejména u soustružení. Spojení oxidační rýhy s výlomem na čele se projeví na zvýšení drsnosti povrchu obrobku. Opotřebení lze zmenšit nebo odstranit, při snížení rezné rychlosti, zvýšení rychlosti posuvu, použití otěruvzdorného substrátu.[28]



Obr. 30: Oxidační rýha na vedlejším břitu [28]

Plastická deformace břitu

Vzniká při obrábění, kde působí kombinace vysokých teplot a rezných tlaků na břit, tedy při obrábění za vysokých rezných rychlostí a posuvů. Tento druh opotřebení lze zmenšit použitím vhodného rezného materiálu s vyšší otěruvzdorností, správného zaoblení ostří a volbou vhodné geometrie.[28]



Obr. 31: Plastická deformace špičky [28]

Tvorba nárůstku

Tvorba nárůstku vzniká nalepováním obráběného materiálu na břit nástroje. Nárůstek má tvar v podobě návaru na břitu. Afinita břitu k materiálu hraje v tomto případě rozhodující roli. Nízká teplota a vysoké tlaky vyvolávají mezi materiálem třísky a čelem nástroje efekt svařování. Při velké tvorbě nárůstku může dojít až k lomu VBD. Pro zábranu vzniku tvorbě nárůstku se používá pozitivní geometrie břitu nástroje a zvýšení řezného posuvu.[28]



Obr. 32: Tvorba nárůstku [28]

Vrubové opotřebení hřbetu

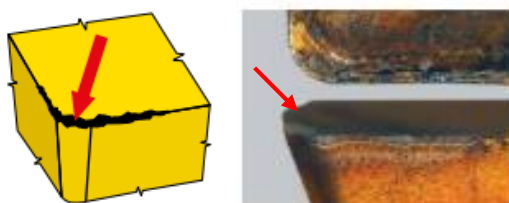
Opotřebení patří k typické adhezní opotřebení. Vruby vznikají v místě kontaktu břitu nástroje s povrchem obrobku. Je zapříčiněno zpevněním povrchových vrstev obrobku a ořepý. Objevuje se převážně u korozivzdorných austenitických ocelí. Pro zamezení vzniku vrubu na hřbetu se používá méně pozitivní geometrii břitu nástroje a menší řezné rychlosti. Na obr. 33, lze vidět opotřebení ve formě vrubu na hřbetě řezného nástroje VB_N . [28]



Obr. 33: Vrubové opotřebení hřbetu [28]

Křehké porušení (mikrovyštipování) břitu

Opotřebení se ve většině případů objevuje v kombinaci s jiným druhem opotřebení. Samostatně je obtížně rozpoznatelné. Nejčastější příčinou tohoto typu opotřebení je obrábění přerušovaným řezem. Toto opotřebení lze odstranit nebo zmenšit, použijeme-li PVD povlak, optimální rychlost posuvu.[28]



Obr. 34: Křehké porušení břitu [28]

Křehké porušení břitu na konci záběru

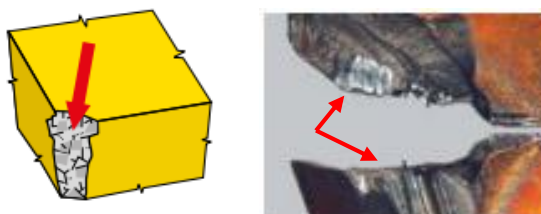
Příčinou vzniku je nevhodné utváření třísky, která při svém odchodu naráží na břit a ten mechanicky poškozuje.[28]



Obr. 35: Křehké porušení břitu na konci záběru [28]

Křehké porušení v oblasti špičky

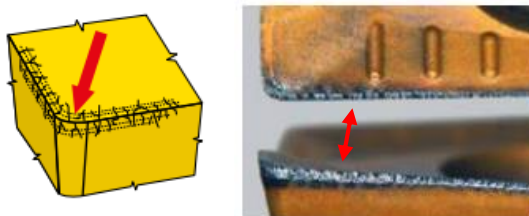
Dojde-li k tomuto opotřebení, představuje to konec funkčnosti rezného elementu. Příčiny vzniku tohoto opotřebení jsou závislé na materiálu nástroje i materiálu obrobku, stavu a především tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek. Aby nenastal lom břitu nástroje, je doporučeno snížit zatížení břitu nástroje a použití PVD povlaku.[28]



Obr. 36: Křehké porušení v oblasti špičky [28]

Tvorba trhlin

Vznik trhlin je formou únavového opotřebení, které vzniká tepelným šokem. Trhliny se tvoří kolmo na ostří. Použití chladicích kapalin se nedoporučuje, protože zvyšuje rozdíl teplot při záběru břitu do materiálu obrobku a při výstupu z něj.[28]



Obr. 37: Tvorba trhlin [28]

4. Nástrojové materiály

V současné době je poměrně široký sortiment materiálů pro řezné nástroje, od nástrojových ocelí až po syntetický diamant, je důsledkem celosvětového dlouholetého a intenzivního výzkumu a vývoje v dané oblasti a má úzkou souvislost s rozvojem konstrukčních materiálů určených pro obrábění, i s vývojem nových obráběcích strojů, zejména s číslicovým řízením.

Výběr vhodného typu nástroje pro obrábění je důležitou součástí každé technologie. Použitím správného nástroje, optimální technologie a řezných podmínek, může být zlepšena kvalita povrchu součásti, snížen odpad a zejména sníženy náklady na výrobu. Volba nástroje na obrábění tvrdých materiálů je ovlivněna obráběným materiálem. Vlastnosti řezné části nástroje významně ovlivňují průběh řezného procesu, ale i obráběný materiál.[23]

Pro obrábění materiálů slitin skupiny ISO - S se používají převážně řezné materiály, jako je slinutý karbid s PVD, slinutý karbidy bez povlaku, slinutý karbid s MTCVD, řezná keramika, CBN a PKD. Dále se bude pouze zabývat o těchto materiálech.

4.1 Slinuté karbidy

K nejdůležitějším výrobkům práškové metalurgie patří SK, používané pro tvářecí a řezné nástroje. V letech 1922 až 1927 byly vyvinuty první SK „WIDIA“. Dnes se SK vyrábí z karbidů, vysokotavitelných těžkých kovů wolframu (WC), titanu (TiC), pojivem je kobalt (CO). Jako další přísady při výrobě se používají karbidy tantalu (TaC) a niobu

(NbC). Největší rozvoj SK nastal na konci 50. let minulého století, kdy se změnilo upevnění VBD z pájené na konstrukci s mechanickým upínáním.[13]

V současnosti většina výrobců SK povlakuje. Povlakované SK se skládají z pevného karbidového podkladu a termochemicky stabilního povlaku (karbidy, nitridy, oxidy a jejich kombinace). Výsledkem povlakování SK se vytvářejí lepší materiály pro vysoké řezné

a posuvové rychlosti, vysoké úběry třísek na čele a prodloužení životnosti nástroje. Mezi prvními na trhu se objevily povlaky z TiC, později byly vyvinuty povlaky TiN a TiCN, nejpozději přišly povlaky Al_2O_3 , které se vyznačují svou vyšší teplotní odolností oproti předchozí skupině materiálů (přibližně $800^\circ C$).[13]

4.1.1 Nepovlakované slinuté karbidy

V současné době jsou nepovlakované slinuté karbidy pro řezné nástroje rozdělovány na základě jejich použití do těchto třech základních skupin:

- Skupina **P** (barva značení modrá)
- Skupina **M** (barva značení žlutá)
- Skupina **K** (barva značení červená)

Jednotlivé skupiny se dále rozdělují podle houževnatosti nástrojového materiálu, např. P10, P20, P30, M10, M20, M30, K10, K20, K30 (kdy vyšší číslo vyjadřuje vyšší obsah pojícího kovu kobaltu, vyšší houževnatost a pevnost v ohybu a nižší tvrdost a ošetrivost materiálu a vymezuje oblast jeho použití pro nižší řezné a vyšší posuvové rychlosti).[3]

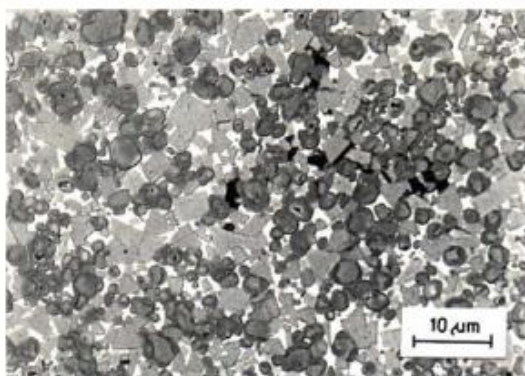
Podle složení se jednotlivé skupiny rozdělují následujícím způsobem [3]:

- Skupina P: WC + TiC + Co + TaC.NbC – struktura na obr. č. 38.
- Skupina M: WC + TiC + TaC.NbC + Co – struktura na obr. č. 39.
- Skupina K: WC + Co + TaC.NbC – struktury na obr. č. 40 a č. 41.

Skupina P

Je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku, jako jsou uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli. Vhodnost slinutých karbidů skupiny P pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku je dána též vyšší tvrdostí TiC (stejně TaC.NbC) za vyšších teplot, ve srovnání s WC.

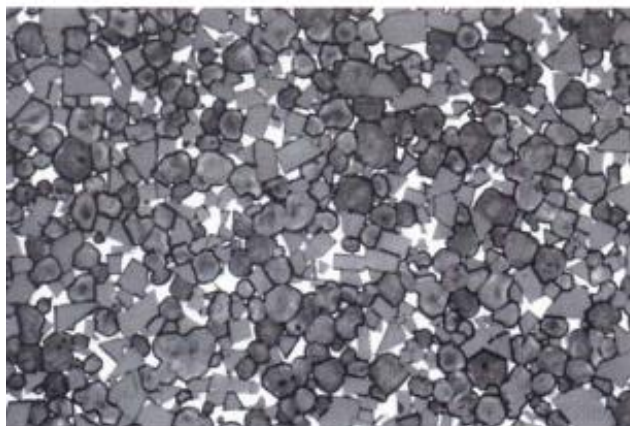
Nevýhodou vlastností TiC a tuhých roztoků na bázi TiC je jejich vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazi ve srovnání s WC.[3]



Obr. 38: SK skupiny P [3]

Skupina M

Má univerzální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jako jsou lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Vzhledem k relativně vysoké houževnatosti se SK této skupiny též často používají pro těžké hrubovací a přerušované řezy.[3]



Obr. 39: SK skupiny M [3]

Skupina K

Je určena pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobnou třísku (zejména pro litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály). Karbid wolframu, který tvoří jedinou tvrdou strukturní složku této skupiny SK má za pokojové teploty zhruba stejnou tvrdost jako TiC, s rostoucí teplotou, ale ztrácí tvrdost rychleji než TiC.

Proto jsou slinuté karbidy této skupiny nevhodné pro obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku, která mnohem více tepelně zatěžuje čelo nástroje (dlouhá tříska má větší plochu styku s čelem nástroje a doba jejího kontaktu s nástrojem je delší).[3]



Obr. 40: Hrubozrný SK skupiny K [3]



Obr. 41: Jemnozrný SK skupiny K [3]

Z běžných slinutých karbidů K, P, M je pouze omezený počet druhů užíván pro lehké a dokončovací obrábění (vysoká řezná rychlost, nízká posuvová rychlost a hloubka řezu). Druhy s vyšším číselným označením jsou obvykle používány pro střední a těžké obrábění nebo hrubování, lze také užít pro frézování a vrtání. Při nepřerušovaném řezání mají slinuté karbidy s nižším obsahem pojící fáze (zařazené do skupin s nižším číselným označením) lepší řezivost vzhledem k větší odolnosti proti plastické deformaci.[3]

4.1.2 Povlakované slinuté karbidy

První povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu pro obrábění vyrobila firma Sandvik Coromant v roce 1969 (materiál GC125, povlak TiC, tloušťka vrstvy $4 \div 5 \mu\text{m}$). S malým časovým odstupem následovaly povlaky typu TiN a TiCN, povlaky Al_2O_3 přišly na trh v polovině 70. let 20. století. Otěruvzdorné vrstvy byly vytvářeny na podkladech z běžných SK metodou CVD, jako jedno i vícevrstvé. Povlaky PVD se jako otěruvzdorné vrstvy na břitových destičkách ze slinutých karbidů začaly používat na začátku 80. let.

Použití

Povlakované slinuté karbidy se používají pro soustružení, frézování a vrtání většiny strojírenských materiálů, včetně těžkoobrobitelných materiálů. Podle principu se metody povlakování dělí do dvou základních skupin CVD a PVD.[3]

Metoda CVD

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze) probíhá za vysokých teplot $900 \div 1200^\circ\text{C}$ a funguje na princip chemického napařování

z plynné fáze. K jejím výhodám patří výborná adheze mezi podkladem a povlakem, možnost nanesení vrstev o větší tloušťce ($10 \div 13 \mu\text{m}$), Touto metodou se povlakuji SK a může se nanášet čtyřmi variantami: tepelně indukovaná, elektronově indukovaná, fotonově indukovaná a plazmaticky aktivovaná. Za nevýhody lze považovat ovlivnění podkladového materiálu (snížení ohybové pevnosti), nemožnost napovlakovat ostré hrany a tahová zbytková napětí v povlaku.[3]

Metoda PVD

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování) je charakteristická nízkými pracovními teplotami (podle některých údajů pod 600°C , 350°C , nebo dokonce 180°C). Tato metoda byla původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, kde nízká teplota zaručovala, že nedocházelo k tepelnému ovlivnění nástroje. K nevýhodám patří tenčí vrstva povlaku (kolem $5 \mu\text{m}$) a menší možnosti výběru typu povlaku.[3]

V poslední době se rozšířila metoda PVD i pro povlakování SK. Pro SK se povlaky nanáší napařováním a naprašováním.[13]

Nejužívanějším povlakem PVD byl jednovrstvý povlak nitrid titanu TiN. Povlaky mohou být jednovrstvé nebo vícevrstvé s jedním nebo více prvky.[3]

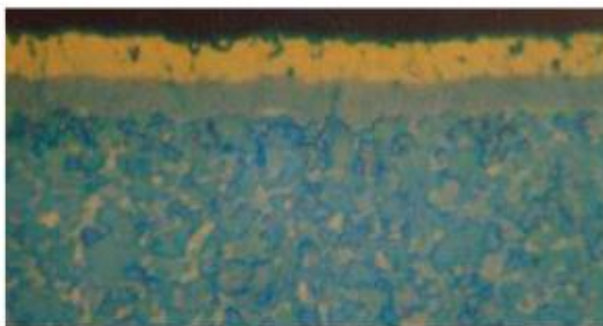
- 1. generace – jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou $7 \mu\text{m}$ a špatnou soudržností podkladu a povlaku.[3]
- 2. generace – jednovrstvé povlaky (viz obr. 42) jsou především tvořeny TiC, TiCN, TiN bez etakarbidu na přechodu podklad- povlak. Zdokonalení technologie výroby umožnilo vytvořit vrstvy povlaků o větší tloušťce (až $13 \mu\text{m}$), bez nebezpečí jejich odlupování při funkci nástroje.[3]



Obr. 42: Jednovrstvý povlak [15]

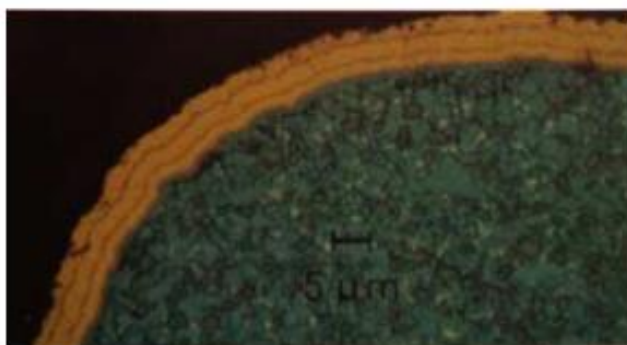
- 3. generace – vícevrstvé povlaky jsou tvořeny dvěma (viz obr. 43) až třemi, případně i více vrstvami s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami.

Řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které mají relativně nižší odolnost proti opotřebení a jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu.[3]



Obr. 43: Dvoivrstvý povlak [15]

- 4. generace – speciální vícevrstvé povlaky mají velmi často více než deset vrstev a mezivrstev (viz obr. 44) s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami (užívají se stejné materiály povlaků jako u 3. generace).[3]



Obr. 44: Vícevrstvý povlak [15]

Povlakované slinuté karbidy jsou vyráběny tak, že na podkladový materiál (původně běžný SK typu K, P nebo M, dnes speciální SK) se nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí s vynikající odolností proti opotřebení (povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost, než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě). Tyto výhodné vlastnosti vyplývají zejména z toho, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů (póry, dutiny) a tvoří bariéru proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje.[3]

4.1.3 Moderní metody povlakování

V souladu s vývojem na konci 80. let minulého století jsou dnes u vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů nejčastěji používány povlaky čtvrté nebo třetí generace. K původním materiálům pro jednotlivé vrstvy (TiC, TiN, TiCN, Al₂O₃), přibývají další nové materiály jako např. CrN, HfN, ZrN, TiZrN, TiAlN, Ti₂N, TiAlSiN, AlTiN, TiN/TaN a další. Některé z nich se ale prozatím nedostaly do stadia sériové výroby a praktického využití.[3]

	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrдость	Tvrдость za tepla
Nejlepší	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
	TiN	TiN	Al ₂ O ₃	TiN
	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
	TiC	TiC	TiN	TiC
Špatná				

Obr. 45: Základní vlastnosti vybraných povlaků [3]

Významnou roli při zvyšování výkonů řezných nástrojů hrají i tzv. lubrikační povlakové vrstvy, např. MoS₂, vytvořené metodou PVD. Jejich nejdůležitější funkcí je výrazně snížit tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou (nižší tepelné zatížení nástroje se pak projeví ve zvýšení jeho trvanlivosti). Velký zájem výrobců je soustředěn též na vývoj a sledování vlastností povlaků z polykrystalického diamantu, jen velmi sporadicky se vyskytující práce, zabývající se povlaky z PKNB.[3]

4.2 Řezná keramika

Řezná keramika se zařazuje do anorganických, nekovových a převážně krystalických materiálů. Vyznačuje vysokou tvrdostí a odolností proti plastické deformaci. Jejich tvrdost se zachovává i při teplotách blízkých se k 1200°C. Další výhodou je, že chemicky nereagují s materiálem obrobku. Nevýhodami tohoto materiálu jsou zejména křehkost a malá tepelná vodivost. Řezné keramiky jsou poměrně levné a základní suroviny jsou celkem snadno dostupné. Základním materiálem je uměle vyrobený korund (Al₂O₃), který

se řadí mezi nejtvrďší materiály, dalšími výchozími materiály jsou oxidy Y_2O_3 , ZrO_2 , karbid TiC a nitridy TiN a Si_3N_4 . [13][14]

Vlastnosti keramických řezných materiálů:

- Vysoká tvrdost za tepla
- Nereagují chemicky s materiálem obrobku
- Dlouhá trvanlivost bříty
- Možnost použití i při vysokých řezných rychlostech

Výhody řezné keramiky:

- Vynikající odolnost proti opotřebení a dlouhá životnost nástroje
- Stabilní pro široký rozsah obráběcích operací
- Jakost povrchu obráběného materiálu

Doporučené použití řezné keramiky:

- Soustružení a vrtání šedé litiny
- Hrubování a dokončovací operace vložek válců
- Soustružení tvrdých materiálů (pod 65 HRC)
- Obrábění šedé litiny vysokými rychlostmi

Keramické materiály, které se používají pro výrobu vyměnitelných břitových destiček řezných nástrojů, jsou obvykle rozdělovány následovně: [13][14]

1) Keramika na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3), ta se dělí:

- a. Čistá – 99,5% Al_2O_3 , má vysokou tvrdost, otěruvzdornost a výbornou chemickou odolnost a stabilitu při vysokých teplotách.
- b. Polosměsná – obsah ZrO_2 je 15 - 20%, který snižuje náchylnost proti lomu a zvyšuje houževnatost, oproti čisté keramice má vyšší pevnost.
- c. Směsná – s přísadami TiN, TiC, které zvyšují odolnost proti tepelným rázům a pevnost, dále zabezpečují stabilitu mechanických vlastností při vysokých teplotách.

2) Keramika na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4)

Nitridovaná keramika na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 má dvě modifikace α a β . V porovnání s keramikou na bázi oxidu hlinitého má nitridová keramika vyšší tepelnou vodivost, pevnost v ohybu, houževnatost a odolnost proti tepelným rázům. Nevýhodou je

nižší chemická stabilita. Doporučuje se pro obrábění šedé a tvárné litiny za sucha i s chladicí kapalinou, dále pro obrábění kalené oceli, titanové, niklové a žáruvzdorné slitiny.

3) Vyztužená keramika

Vyztužené keramiky jsou velmi perspektivní materiály pro řezné nástroje, které značně zvyšují řezné vlastnosti. Vyrábějí se na základě toho, že do základní matrice (Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, Si_3N_4 , atd.) se přidávají vlákna SiC nebo Si_3N_4 (whiskery). Pevnost whiskerů se blíží k teoretické pevnosti materiálu a proto výrazně zpevňují i materiál. Vlastnosti keramik vyztužených whiskery jsou ovlivněny především průměrem, délkou vlákna a stíhlostním poměrem a množstvím whiskerů v matrici materiálu.

Supertvrdé nástrojové materiály

Mezi supertvrdé řezné materiály se řadí: polykrystalický nitrid bóru (PKNB) a polykrystalický diamant (PKD). Tyto materiály patří k vůbec nejtvrdějším materiálům, ovšem mají velkou nevýhodu, jsou velmi drahé. V porovnání s ostatními materiály obsahují také velmi malé hodnoty ohybové pevnosti, což má při obrábění za následek použití malého posuvu. Porovnání supertvrдых řezných materiálů s ostatními řeznými materiály při teplotě 20°C je uvedeno v tab. 10.[13]

Tab. 4: Vlastnosti řezných materiálů [27]

Řezný materiál	Tvrdość [HV]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Pevnosť v ohybu [MPa]	Teplotní odolnosť [°C]
Rychlořezné oceli (RO)	750÷800	2500÷3500	2000÷3000	560÷610
Slituté karbidy (SK)	1300÷2000	4000÷5600	900÷2200	900÷1100
Řezná keramika	1600÷2800	3500÷4500	450÷1000	1300÷1600
Kubický nitrid bóru	4500	4000	600	1500
Polykrystalický diamant	7000	3000	300	320÷720

Z tabulky lze říci, že nejvýhodnější řezný materiál je kubický nitrid bóru, jehož tepelná stálost je až 1600°C, zatím co diamant se rozkládá při 700°C. Pro jeho lepší využití je možné použít chladicí kapalinu.[27]

4.3 Polykrystalický nitrid bóru (PKNB)

Polykrystalický kubický nitrid bóru je tvořený kubickým nitridem bóru, který je spojen do jednoho celku za použití pojiva. Polykrystalický nitrid bóru se zařazuje do tvrdých materiálů, jeho tvrdost se blíží tvrdosti diamantu. Kubický nitrid bóru se používá pro obrábění (soustružení a frézování) kalených ocelí a tvrzených litin, tam nahrazuje broušení. Výroba tohoto řezného materiálu probíhá za vysoké teploty a tlaku, při kterých se spojují kubické krystaly bóru s keramickým nebo kovovým pojivem. Vzhledem k vysoké ceně je neekonomické obrábět měkčí materiály, které nedosahují minimální doporučené tvrdosti 45 HRC. Zachovává si vysokou tvrdost i při teplotách okolo 2000°C.[3][13]

Vlastnosti

Kubický nitrid bóru je houževnatý materiál, má dobrou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, má vysokou tvrdost za tepla i při vysokých teplotách (až do 2000°C) a při obrábění vykazuje dobrou chemickou stabilitu. Na rozdíl od slinutých karbidů je kubický nitrid bóru křehčí a oproti keramice je méně teplotně a chemicky stálý. Vlastnosti materiálu lze upravit obsahem a typem pojiva nebo velikostí krystalů. Nástroj s nízkým obsahem kubického nitridu bóru je křehčí, ale je lepší pro obrábění tvrdých slitin železa. Nástroje s vyšším obsahem kubického nitridu bóru jsou více houževnaté. Používají se tam, kde při hrubování dochází k velkému mechanickému namáhání břitu a vysokým tepelným zatížením.[3][13]

Doporučené použití:

- Obrábění materiálů s tvrdostí nad 45 HRC
- Vysokorychlostní hrubování s přerušovaným řezem
- Kalené oceli a šedé litiny
- Soustružení tvrdých materiálů (kalené, vysokolegované, nástrojové a rychlořezné oceli)
- Vysokorychlostní frézování

Výhody:

- Výborná odolnost proti abrazivnímu a brusnému opotřebení
- Vysoká tvrdost za tepla i při vysokých teplotách (až do 2000°C)

4.4 Polykrystalický diamant (PKD)

Polykrystalický diamant je nejtvrděší nástrojový materiál, ale ovšem velmi křehký. PKD se nesmí používat k obrábění materiálů na bázi železa z důvodu nízké teplotní stálosti (nad 650°C se mění na grafit). Na čele nástroje by docházelo k velmi rychlému opotřebení kvůli probíhajícím chemickým reakcím. Používá se pro obrábění hliníkových slitin, vyztužených kompozitů, titanu a jeho slitin, keramiky, grafitu a tvrdých přírodních materiálů. Lze použít řezné rychlosti okolo 5000 m.min⁻¹. Na chlazení při obrábění se nekladou žádné speciální požadavky, lze chladit běžnými procesními kapalinami.[3][13]

Výhody:

- Vysoká životnost
- Odolnost proti abrazivnímu opotřebení
- Rychlost a výkon
- Přesnost
- Výborná kvalita povrchu

Použití:

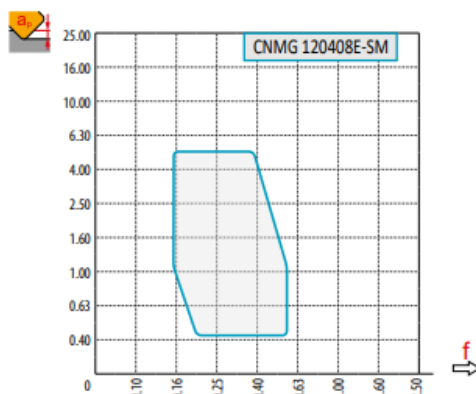
- Neželezné kovy
- Grafit
- Plasty s obsahem skla
- Keramika a tvrdé přírodní materiály

5. Přehled vybraných destiček

5.1 Dormer pramet

Společnost Dormer Pramet je předním světovým dodavatelem výrobků pro obrábění kovů a souvisejících služeb. Firma vyrábí pozitivní břitové destičky ISO (NF1, SF2, SF3, NF2) a negativní břitové destičky ISO (SF, SM, NRM, NR2, NF, NM) pro obrábění materiálů skupiny S. Úhel hřbetu u pozitivních břitových destiček se pohybuje okolo 7° , zatímco u negativních břitových destiček je úhel hřbetu roven nule. V dnešní době se pro obrábění používají převážně negativní břitové destičky, pozitivní břitové destičky se používají spíše pro vnitřní soustružení a pro menší úběry třísek.

Materiály pro soustružení skupiny S jsou T7325 (slinutý karbid s MTCVD), o něco houževnatější materiál T7335 (slinutý karbid s MTCVD), T6310 (slinutý karbid s PVD), H07 (slinutý karbid bez povlaku). Nejpoužívanější destička, která se používá k obrábění je destička CNMG 120408E-SM.[28]



Obr. 47: Břitová destička CNMG [28] Obr. 46: Oblast vhodného utváření třísek [28]

V následující tabulce je uvedeno startovní řezné podmínky pro jednotlivé břitové destičky typu CNMG 120408E-SM pro obrábění za sucha.[28]

Tab. 5: Startovní řezné podmínky pro dané destičky [28]

VBD	Zaoblení špičky	Řezná rychlost vc [m/min]	Posuv f [mm/ot]	Hloubka řezu ap [mm]
T7325	0,4	55	0,2	1,6
T7335	0,4	55	0,2	1,6
T6310	0,4	45	0,2	1,6

5.2 Sandvik Coromant

Společnost Sandvik Coromant je předním dodavatelem nástrojů a know-how pro oblast obrábění kovů. Sandvik Coromant vyrábí břitové destičky pro soustružení korozivzdorných ocelí, titanu a žárovzdorných slitin (HRSA). S205 je nová nástrojová třída s povlakem nanášeným chemickou depozicí z plynné fáze (CVD), který se využívá pro soustružení žárovzdorných slitin, konkrétně pro poslední stádium obrábění dílů letadlových motorů. Výhody této třídy jsou vyšší řezné rychlosti, tzn. Vyšší produktivita, vynikající odolnost proti opotřebení hřbetu a adheznímu otěru se promítá v delší životnosti nástrojů. Pro obrábění korozivzdorných ocelí je první volba nástrojová třída GC2025. Má výbornou odolnost vůči tepelným a mechanickým rázům. Je vhodná pro polodokončování až hrubování.[33][34]



Obr. 49: VBD S205 [33]



Obr. 48: VBD GC2025 [34]

V následujících tabulkách jsou uvedeny další typy VBD a jejich doporučené řezné podmínky pro soustružení korozivzdorných ocelí, titanu a žárovzdorných ocelí.

Tab. 6: Doporučené řezné podmínky pro vybrané VBD pro soustružení titanu a žárovzdorných ocelí [33]

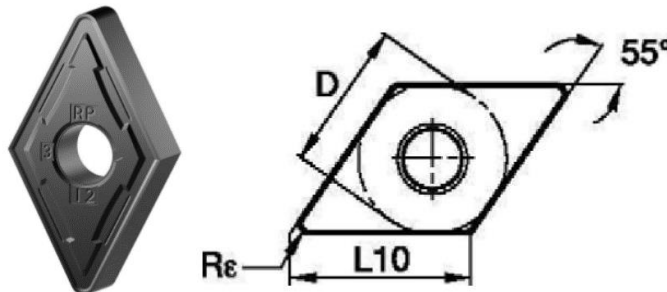
VBD	Typ operace	Poloměr rohu [mm]	Řezná rychlost vc [m/min]	Posuv f [mm/ot]	Hloubka řezu ap [mm]
RCMT 08 03 MP-H7 1105	Hrubování	4	50-80	0,17-0,45	0,8-2
RCMT 08 03 MP-L3 1105	Dokončovací	4	70-80	0,09-0,38	0,2-1,6
RCMT 08 03 MP-M3 1105	Střední	4	60-80	0,17-0,43	0,4-2

Tab. 7: Doporučené řezné podmínky pro vybrané VBD pro soustružení korozivzdorných ocelí [34]

VBD	Typ operace	Poloměr rohu [mm]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv f [mm/ot]	Hloubka řezu a_p [mm]
CP-B1108-M5 2025	Střední	0,8	125-225	0,31-1,21	0,5-4
CP-A1104-L5 2025	Dokončovací	0,4	180-235	0,2-0,5	0,25-3

5.3 Kennametal

Společnost Kennametal vyrábí negativní břitové destičky DNMG-RP, které se využívají pro obrábění materiálu třídy P, M, K a S. KC5510 je první volbou pro dokončování až střední obrábění tepelně odolných materiálů a titanu. Povlak PVD byl speciálně vyvinut pro řešení vznikání velkého tepla při obrábění těchto materiálů. Jako další VBD pro obrábění titanu a těžkoobrobitelných materiálů je KC5010, KC5025, KC5525, apod.[35]



Obr. 50: Negativní břitová destička DNMG-RP [35]

5.4 Seco-tools

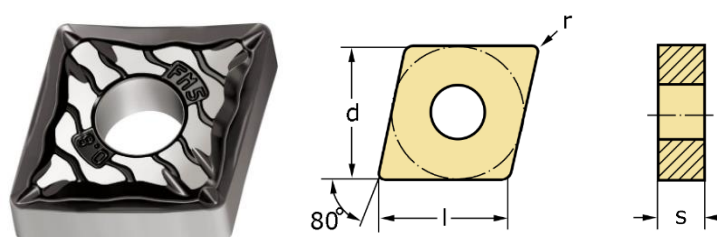
Firma Seco-tools má rozsáhlý výběr druhů VBD pro obrábění titanu a těžkoobrobitelných materiálů. Destičky typu CC0602 a CC0903 se využívají pro obrábění materiálů skupiny N, S a H. V následující tabulce jsou uvedeny vybrané VBD destičky a jejich doporučené řezné podmínky pro obrábění materiálů skupiny S.[36]

Tab. 8: Doporučené řezné podmínky pro jednotlivé VBD pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů [36]

VBD	Rohový rádius [mm]	Řezná rychlost vc [m/min]	Posuv f [mm/ot]	Hloubka řezu ap [mm]
CCGT0602005- F1 CP500	0,05	245	0,012	0,55
CCGT060201- F1 CP500	0,10	230	0,0240	0,55
CCGT060202F- AL TS2050	0,20	36	0,028	0,30
CCMT090304- F2 HX	0,40	500	0,18	1,1

5.5 Walter-tools

Společnost Walter náleží celosvětově k předním společnostem v oboru obrábění kovů. Pro obrábění materiálů typu S, tedy titanové slitiny a superslitiny, se používají VBD typu WSM01, WSM10S, WSN20S, WSM30S, WS10. Tyto VBD lze použít na obrábění všech druhů těžkoobrobitelných materiálů. Firma dále vyrábí VBD s utvařeči na konkrétní materiály, jako je slitina na bázi Ni, Co, Fe, slitiny na bázi titanu, slitiny na bázi Ni, Co, Fe a titanu.[37]



Obr. 51: VBD CNMG120402-FM5 WSM10S

V následující tabulce budou uvedeny vybrané druhy VBD a jejich doporučené řezné podmínky pro obrábění titanu a těžkoobrobitelných materiálů.[37]

Tab. 9: Vybrané VBD a jejich doporučené řezné podmínky [37]

VBD	Poloměr špičky [mm]	Posuv na otáčku f [mm/ot]	Hloubka řezu ap [mm]
CNMG120402-FM5 WSM10S	0,2	0,03-0,1	0,1-1
CNMG120402-FM5 WSM20S	0,2	0,03-0,1	0,1-1
CNMG120402-MM5 WSM30S	0,4	0,1-0,2	0,5-3
CNMG120404-MS3 WSM01	0,4	0,12-0,25	0,6-3
CNMG120404-MS3 WS10	0,4	0,12-0,25	0,6-3

5.6 Iscar

Společnost Iscar vyrábí řezné břitové destičky a držáky. Jejich výrobní zařízení jsou univerzální a flexibilní. Výrobní dovednosti této firmy je velice spolehlivá a časově efektivní. Během jednoho dne lze vyrobit zcela nový nástroj. Pro obrábění titanu a těžkoobrobitelných materiálů je první volbou VBD typ WMNG, další volbou je CNMG. Pro dokončovací operace se využívá negativní VBD WMNG/CNMG-F3S, pro pozitivní VBD WMNG/CNMG-F3M. Pro střední obrábění se používají negativní VBD WMNG/CNMG-M3M, a pro pozitivní VBD WMNG/CNMG-M3M. V následující tabulce budou uvedeny vybrané VBD pro obrábění titanu a těžkoobrobitelných materiálů skupiny S.[38]

Tab. 10: Vybrané VBD pro obrábění materiálů skupiny S [38]

VBD	Poloměr špičky [mm]	Řezná rychlost vc [m/min]	Posuv f [mm/ot]	Hloubka řezu ap [mm]
WNMG 060404-F3M	0,4	180-235	0,05-0,30	0,10-1,50
WNMG 060412-F3M	1,2	105-210	0,15-0,50	0,20-2,50
WNMG 080408-F3M	0,8	125-225	0,10-0,40	0,10-1,50
WNMG 060404-M3M	0,4	155-210	0,12-0,40	0,50-3,50

WNMG 060412-M3M	1,2	90-195	0,20-0,60	0,50-3,50
WNMG 080408-M3M	0,8	70-170	0,15-0,50	0,50-5,00
WNMG 060404-F3S	0,4	180-235	0,05-0,30	0,10-1,50
WNMG 060408-F3S	0,8	125-225	0,10-0,35	0,10-1,50
WNMG 080408-F3S	0,8	125-225	0,10-0,35	0,10-1,50
CNMG 090404-F3M	0,4	180-235	0,05-0,30	0,10-1,50
CNMG 090408-F3M	0,8	125-225	0,10-0,40	0,10-1,50
CNMG 120412-F3M	1,2	130-215	0,15-0,50	0,20-2,00
CNMG 090404-M3M	0,4	160-190	0,12-0,40	0,40-4,00
CNMG 120408-M3M	0,8	125-225	0,15-0,50	0,50-5,00
CNMG 190608-M3M	0,8	70-140	0,30-0,70	3,00-10,00
CNMG 090404-F3S	0,4	180-235	0,05-0,30	0,10-1,50
CNMG 120404-F3S	0,4	180-235	0,05-0,30	0,10-1,50
CNMG 120408-F3S	0,8	125-225	0,05-0,30	0,10-1,50

6. Technologické zkoušky

Z důvodu rekonstrukce školních laboratoří jsem bohužel zkoušku nemohl provést osobně. Firma Dormer pramet mi byla ochotna poskytnout podklady týkající se mého tématu, které jsem využil v mé bakalářské práci. Z důvodu stanovených podmínek s firmou, se v práci nesmí uvádět jakékoliv identifikační znaky (tzn.: výrobce, označení řezného materiálu nebo geometrie, apod.).

V práci budu tedy pouze uvádět např. označení vzorek č. 1, zkouška č. 1, apod. Dále bych chtěl podotknout, že druhá část zkoušky (trvanlivost nástroje), byla zpracována z částí Ústavem výrobních strojů a zařízení RCMT Horská.

6.1 První část – utváření třísky

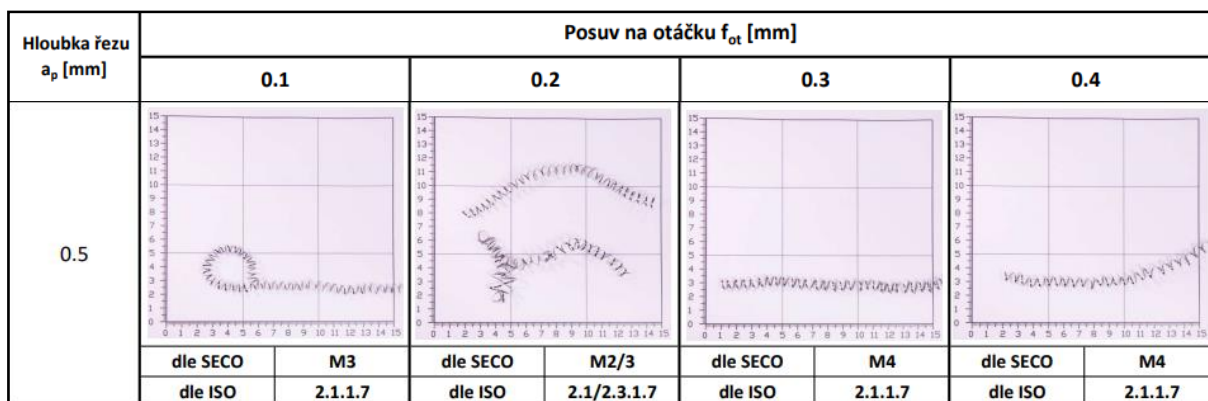
V této části se vyhodnocuje utváření třísky na obráběném materiálu č. 1. Materiál je označován jako vzorek č. 1. Z důvodu stanovených podmínek se vlastnosti a geometrie rezného nástroje, včetně výrobce neuvádí. Uvádí se pouze nástroj č. 1.

Vzorek č. 1

Jako vzorek č. 1 byl zvolen obráběný materiál č. 1. Řezné podmínky pro obrábění vzorku č. 1 jsou následující: rezná rychlost $v_c = 44 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a je konstantní po celou dobu zkoušky, bude se tedy pouze měnit hloubka řezu a_p od 0,5 mm až 4 mm a posuv na otáčku f_{ot} od 0,1 mm až 0,4 mm.

V následujícím obr. 52 je vidět začátek procesu utváření třísky vzorku č. 1 s počátečními reznými podmínky: rezná rychlost $v_c = 44 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, hloubka řezu $a_p = 0,5 \text{ mm}$ a posuv na otáčku f_{ot} od 0,1 mm až 0,4 mm. Tento obráběný materiál má nízkou tepelnou vodivost, což vede k vysoké koncentraci tepla v místě řezu. To má za následek strukturální změny a fázové transformace v tříse. Vzniká tzv. segmentová tříska, která se tvoří na začátku procesu obrábění, kdy dochází kontakt nože s právě se tvořícím segmentem. Je to dáno tím, že se zvyšuje plastická deformace smykem. Jedná se o tzv. adiabaticky stříhový pás. Vzniká projevem nestability deformace, způsobenou špatnou tepelnou vodivostí materiálu.

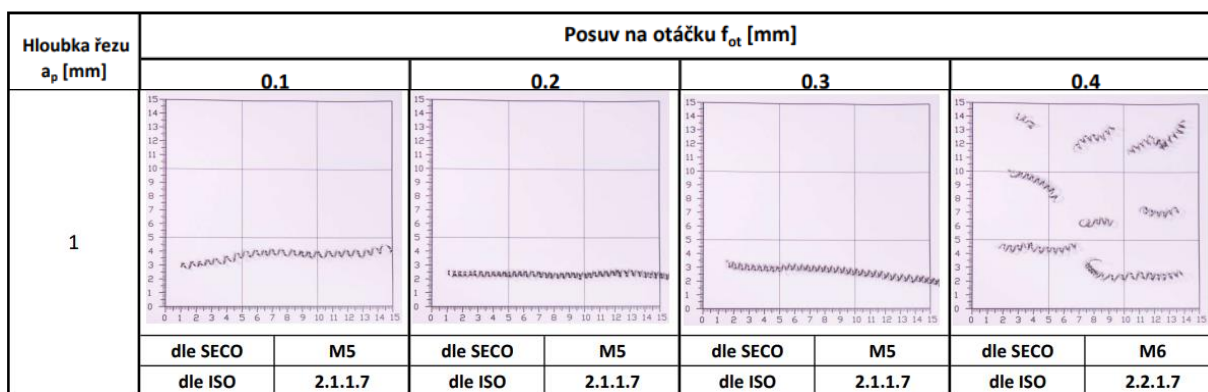
V tomto případě se nám tvoří soudržná tříska konkrétně plynulá segmentová tříska. Tento druh třísky vzniká, pokud při kluzu nedojde prakticky k porušení materiálu a soudržnost částí materiálu je vysoká. Je charakteristická tím, že se nedělí a z místa obrábění odchází plynule. Nevýhodou je, že tato tříska velmi rychle zaplňuje pracovní prostor, obtížně se s ní manipuluje a hrozí namotání třísky na funkční prvky stroje a na nástroj. Dále z obr. je vidět, že při dané rezné rychlosti $v_c = 44 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a hloubce řezu $a_p = 0,5 \text{ mm}$ je tvar třísky v závislosti na posuvu konstantní.



Obr. 52: Utváření třísek - $a_p = 0,5$, materiál č. 1 [25]

Při zvýšení hloubky řezu z $a_p = 0,5 \text{ mm}$ na $a_p = 1 \text{ mm}$ (viz obr. 53) můžeme pozorovat, že při posuvu na otáčku od 0,1 mm po 0,3 mm se tvar třísky pomalinku mění.

Mezera mezi jednotlivými elementy se zmenšuje. Tříška je stále tzv. plynulá ale při zvýšení posuvu na otáčku na $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$ už dochází k přeměně třísky z plynulé třísky na krátkou článkovitou třísku. Tříška odchází po čele v kratších celcích ve tvaru různě tvarovaných pásků. Při její tvorbě dochází ke kluzu na hranici NO deformace a soudržnost jednotlivých elementů je částečně porušena. K porušení soudržnosti mezi jednotlivými elementy třísky dochází při jejím odchodu z místa řezu. Příčinou porušení soudržnosti je chlazení třísky.



Obr. 53: Utváření třísek - $a_p = 1$, materiál č. 1 [25]

Na obr. 54 vidíme, že při hloubce řezu $a_p = 2 \text{ mm}$ a při posuvu na otáčku f_{ot} od 0,1 mm až 0,2 mm, nám vzniká stále plynulá tříška. Při posuvu na otáčku $f_{ot} = 0,3 \text{ mm}$ nám opět vzniká krátká článkovitá tříška. Při $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$ už dochází k tvorbě elementární třísky.

Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na otáčku f_{ot} [mm]							
	0.1		0.2		0.3		0.4	
2								
	dle SECO	M3	dle SECO	M3	dle SECO	M6	dle SECO	M7
	dle ISO	5.3.1.7	dle ISO	5.3.1.7	dle ISO	5.2.1.7	dle ISO	6.1.1.7

Obr. 54: Utváření třísek - $a_p = 2$, materiál č. 1 [25]

Pro $a_p = 3 \text{ mm}$ nám vzniká plynulá segmentová tříška pouze při posuvu na otáčku $f_{ot} = 0,1 \text{ mm}$. Při posuvu na otáčku $f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$ vzniká dlouhá článkovitá třísky, od $f_{ot} = 0,3 \text{ mm}$ vzniká krátká článkovitá tříška a při $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$ vzniká elementární tříška.

Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na otáčku f_{ot} [mm]							
	0.1		0.2		0.3		0.4	
3								
	dle SECO	M2	dle SECO	M5	dle SECO	M6	dle SECO	M7
	dle ISO	5.3.1.7	dle ISO	5.1.1.7	dle ISO	5.2.1.7	dle ISO	5.2/6.1.1.7

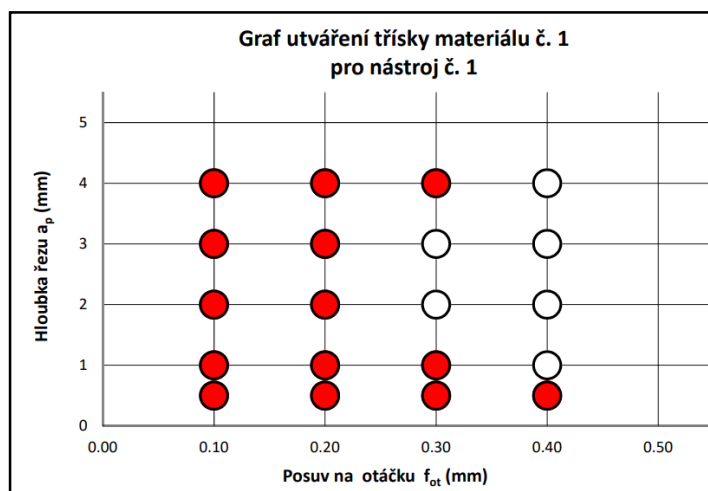
Obr. 55: Utváření třísek - $a_p = 3$, materiál č. 1 [25]

Z obr. 56 lze vidět, že při hloubce řezu $a_p = 4 \text{ mm}$ a při posuvu na otáčku $f_{ot} = 0,1 \text{ mm}$ až $0,2 \text{ mm}$ nám vzniká plynulá segmentová tříška. Při $f_{ot} = 0,3 \text{ mm}$ už vzniká dlouhá článkovitá tříška. A při $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$ vzniká elementární tříška.

Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na otáčku f_{ot} [mm]							
	0.1		0.2		0.3		0.4	
4								
	dle SECO	N5	dle SECO	M5	dle SECO	M5/6	dle SECO	M6
	dle ISO	5.1.2.8	dle ISO	5.1.1.7	dle ISO	5.1.1.7	dle ISO	5.2.1.7

Obr. 56: Utváření třísek - $a_p = 4$, materiál č. 1 [25]

Na závěr vidíme na obr. 57 graf, kde je závislost mezi hloubkou řezu a_p a posuvu na otáčku f_{ot} . Červená políčka na grafu značí vhodné nebo doporučené řezné podmínky pro utváření tohoto materiálu, aby vznikala dlouhá plynulá tříška, která je vhodná pro obrábění. Bílá políčka značí nedoporučené řezné podmínky, při těchto podmínkách vzniká krátká článkovitá až elementární (drobná) tříška, které jsou nevhodné pro obrábění.


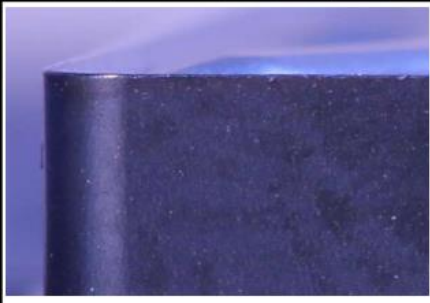


Obr. 57: Graf vhodného utváření třísky materiálu č. 1 [25]

6.2 Druhá část – trvanlivost nástroje

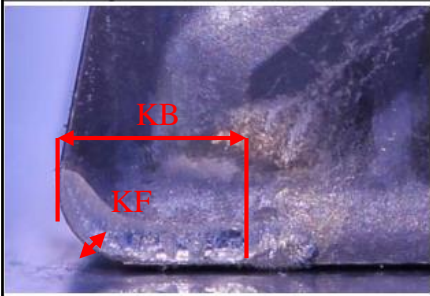
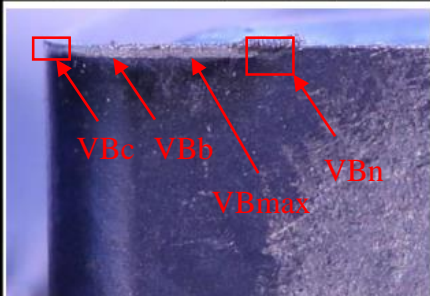
V této části zkoušky se zkoumá trvanlivost nástrojů, tedy závislost mezi opotřebením břitu nástroje na čas t . Porovnává se pět různých nástrojů. Vyhodnocuje se pouze jeden vzorek, bude to nástroj č. 4, je to totožný nástroj, který se použil při první zkoušce (utváření třísek). Na závěr bude porovnání jednotlivých nástrojů a jejich opotřebením jak na čele, tak i na hřbetu nástroje v závislosti na čase t .

Jak bylo zmíněno v minulém odstavci, tak řezný nástroj je totožný s nástrojem pro zkoušku utváření třísek. Liší se tedy pouze v označení, místo nástroj č. 1 nyní bude nástroj č. 4 a v řezných podmínkách, které jsou následující: řezná rychlost $v_c = 44 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv na otáčku $f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$, hloubka řezu $a_p = 2 \text{ mm}$, spočítaný odebraný materiál na 1 přejezd je $52,8 \text{ cm}^3$. Tyto hodnoty budou po celou dobu zkoušky konstantní a bude se zkoumat pouze závislost mezi opotřebením řezného nástroje na čase t . V následujícím obr. 58, lze vidět počáteční stav řezného nástroje před procesem obrábění.

Nástroj č. 4				Výrobce č. 4				
Foto čelo				Foto hřbet 1				Foto hřbet 2
T1 [min]	KF [μm]	KB [μm]	KT [μm]	VBc [μm]	VB _b [μm]	VB _{max} [μm]	VBn [μm]	
0.00	0	0	0	0	0	0	0	
								

Obr. 58: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při $t = 0 \text{ min}$. [25]



Obr. 59 zobrazuje znaky opotřebení nástroje v čase $t = 4 \text{ min}$. Značné příznaky opotřebení se nachází převážně na čele řezného nástroje. Vzniká tzv. opotřebení ve tvaru žlábků, který je způsobeno vlivem působení mechanismů difúzního opotřebení a abraze. Pro tento obráběný materiál je tento druh opotřebení úzký a hluboký. Opotřebení může změnit geometrii břitu a tak ovlivnit tvar třísky, směr působení síly řezání a dojde k zeslabení břitu. Označení KB na fotografii značí šířku žlábků, označení KF značí vzdálenost žlábků od čela (daného bodu) a KT značí hloubka žlábků, v tomto případě to nelze zjistit. Dále lze vidět, že nám vzniká opotřebení přímé části řezné hrany hřbetu, která vzniká v místě styku nástroje a obráběného materiálu a v průběhu procesu. Na tvar a umístění oxidační rýhy má vliv velikost posuvu. Při velkém opotřebení hřbetu může nastat zhoršení jakosti obrobeného povrchu, nepřesnost rozměrů a narůstání tření. Označení VBc značí opotřebení v oblasti špičky nástroje, VB_b je opotřebení přímé části ostří (průměrné), VB_{max} je maximální opotřebení a VBn je opotřebení ve tvaru vrubu. Všechny tyto rozměry jsou v mikrometrech.

Nástroj č. 4				Výrobce č. 4				
Foto čelo				Foto hřbet 1				Foto hřbet 2
T_1 [min]	KF [μm]	KB [μm]	KT [μm]	VBc [μm]	VB _b [μm]	VB _{max} [μm]	VBn [μm]	
4.00	103	1039	0	100	103	126	125	
								

Obr. 59: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při $t = 4$ min.[25]

Na obr. 60 je vidět opotřebení rezného nástroje v čase $t = 8$ min. Lze vidět, že šířka žlábků se zvětšila od minulého měření o 6 mikrometrů, vzdálenost žlábků od čela je stále stejný. Dále lze vidět, že opotřebení v oblasti špičky nástroje se zvětšil o celých 30 mikrometrů, opotřebení přímé části ostří se zvětšil o 17 mikrometrů a maximální opotřebení na hřbetě se zvětšil o též 17 mikrometrů. Opotřebení vrubové se zvětšilo pouze o 2 mikrometry.


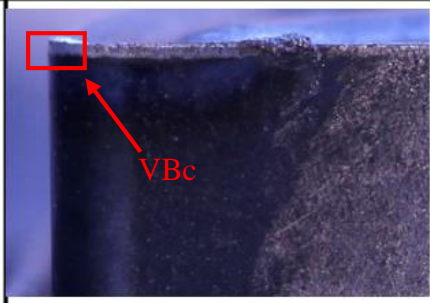
Vyskytuje se zde další typ opotřebení, tzv. nárůstek. Vzniká nalepováním obráběného materiálu na břit nástroje. Má tvar v podobě návaru na břitu. Při velké tvorbě nárůstku může dojít až k lomu VBD. Pro jeho zábranu se zvyšuje řezný posuv.

Nástroj č. 4				Výrobce č. 4				
Foto čelo				Foto hřbet 1				Foto hřbet 2
T_1 [min]	KF [μm]	KB [μm]	KT [μm]	VBc [μm]	VB _b [μm]	VB _{max} [μm]	VBn [μm]	
8.00	103	1045	0	130	120	143	127	
								

Obr. 60: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při $t = 8$ min.[25]


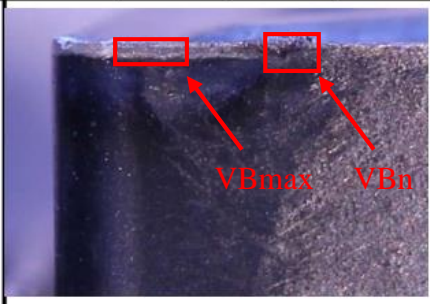
Na obr. 61 je vidět, že šířka žlábků KB je stále stejná, tedy $KB = 1045$ mikrometrů. V tomto případě se změnila vzdálenost žlábků od čela, od minulého měření klesla

hodnota KF na 94 mikrometrů. Další znatelnou změnu lze pozorovat na hřbetě nástroje, konkrétně na špičce. Opotřebení v oblasti špičky se od minulého měření zvětšil o celých 29 mikrometrů. Dále se zvětšilo opotřebení na hřbetě přímé části VB_b o 14 mikrometrů (průměrné).

Nástroj č. 4				Výrobce č. 4				
Foto čelo				Foto hřbet 1				Foto hřbet 2
T ₁ [min]	KF [μm]	KB [μm]	KT [μm]	VB _c [μm]	VB _b [μm]	VB _{max} [μm]	VB _n [μm]	
12.00	94	1045	0	159	134	143	127	
								

Obr. 61: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při t = 12 min.[25]

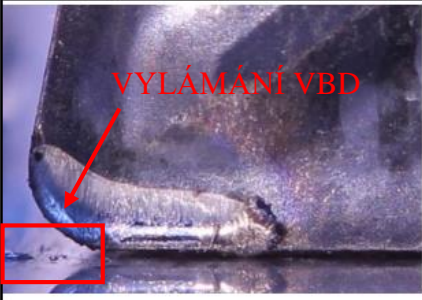

Maximální opotřebení na hřbetě nástroje v čase t = 14 min. (viz obr. 62) se značně zvětšil o 35 mikrometrů. Dále výraznou změnu od minulého měření je opotřebení na hřbetě přímé části, která se zvětšila na hodnotu 152 mikrometrů a vrubové opotřebení zasáhla hodnotu 157 mikrometrů. Vrub na obrázku nelze moc vidět, z důvodu překrytí nárůstkem. Opotřebení na čele v tomto případě nevykazovaly velké změny od minulého měření.

Nástroj č. 4				Výrobce č. 4				
Foto čelo				Foto hřbet 1				Foto hřbet 2
T ₁ [min]	KF [μm]	KB [μm]	KT [μm]	VB _c [μm]	VB _b [μm]	VB _{max} [μm]	VB _n [μm]	
14.00	94	1065	0	168	152	178	157	
								

Obr. 62: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při t = 14 min.[25]


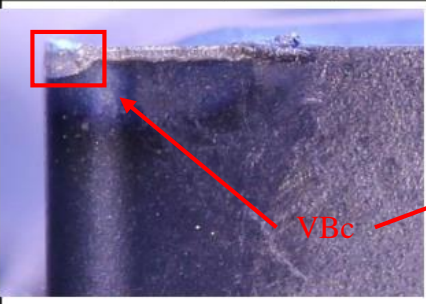
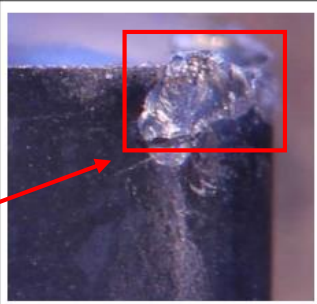
Na obr. 63 je vidět opotřebení nástroje v čase t = 16 min. Z obr. lze značně pozorovat, že opotřebení ve tvaru nárůstku se značně zvětšil a došlo k částečnému vylámaní VBD. Další

výraznou stopou je opotřebení v oblasti špičky nástroje, který se zvětšil na hodnotu 223 mikrometrů.

Nástroj č. 4				Výrobce č. 4				
Foto čelo				Foto hřbet 1				Foto hřbet 2
T ₁ [min]	KF [μm]	KB [μm]	KT [μm]	VB _c [μm]	VB _b [μm]	VB _{max} [μm]	VB _n [μm]	
16.00	92	1080	0	223	173	191	157	
								

Obr. 63: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při t = 16 min.[25]

Poslední měření proběhlo v čase t = 18 min. Na obr. 64 lze vidět i obraz hřbetu řezného nástroje z druhé strany. V tomto čase už dochází k extrémnímu opotřebení v oblasti špičky nástroje, kdy hodnota dosahuje až na 434 mikrometrů, což je značně nepřijatelné k dalšímu procesu obrábění.

Nástroj č. 4				Výrobce č. 4				
Foto čelo				Foto hřbet 1				Foto hřbet 2
T ₁ [min]	KF [μm]	KB [μm]	KT [μm]	VB _c [μm]	VB _b [μm]	VB _{max} [μm]	VB _n [μm]	
18.00	92	1092	0	434	173	196	164	
								

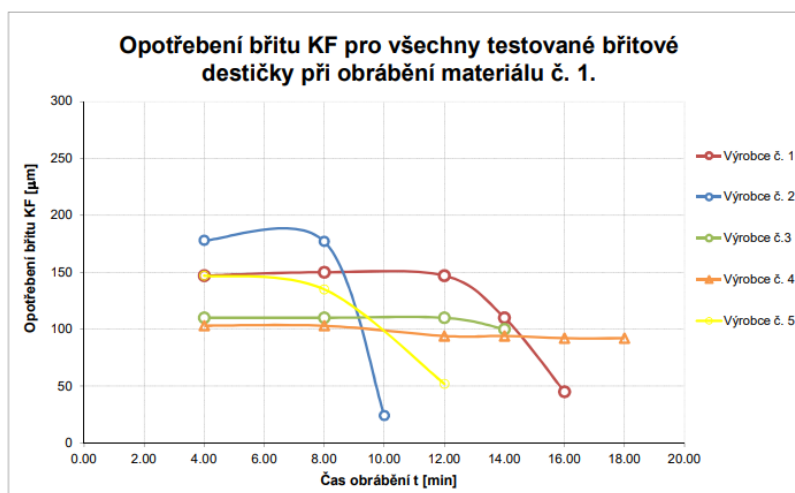
Obr. 64: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při t = 18 min.[25]

V následující tabulce je shrnutí hodnot jednotlivých opotřebení (v mikrometrech). Od času $t = 0$ min. až $t = 18$ min. Po intervalech 4 minutách. Tedy z tabulky je vidět, že největší skok nastal mezi časem 14, 16 a 18. Po 18. minutě už došlo k značnému poškození v oblasti špičky nástroje a tím už je nepřijatelný pro další procesy obrábění.

Tab. 11: Velikosti opotřebení v závislosti na čas t [25]

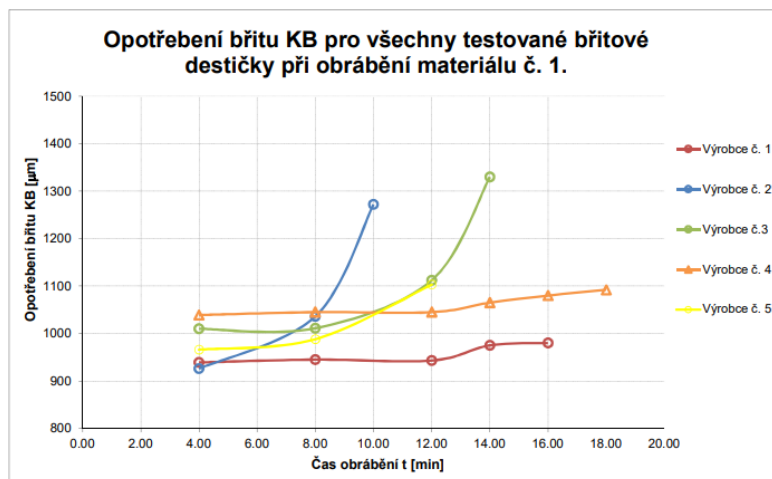
T_1 [min]	KF [μm]	KB [μm]	KT [μm]	VB_c [μm]	VB_b [μm]	VB_{\max} [μm]	VB_n [μm]
0.00	0	0		0	0	0	0
4.00	103	1039		100	103	126	125
8.00	103	1045		130	120	143	127
12.00	94	1045		159	134	143	127
14.00	94	1065		168	152	178	157
16.00	92	1080		223	173	191	157
18.00	92	1092		434	173	196	164
20.00							

Na následujícím obrázku vidíme graf, kde se porovnává 5 různých nástrojů. Jak bylo zmíněno na začátku kapitoly „Technologické zkoušky“, tak byl použit nástroj č. 4 pro obě předchozí zkoušky. Tedy z grafu lze pozorovat, že nástroj č. 4 má konstantní opotřebení břitu KF neboli vzdálenost žlábků od čela po celou dobu zkoušky, tedy od 4. minuty po 18. minutě. Pro nástroj č. 2 vidíme, že hodnota KF klesla prudce při 10. minutě. Je to dáno tím, že velikost opotřebení ve tvaru žlábků pro tento nástroj č. 2 překročil hranici už v 10. minutě, který můžeme vidět na obr. 66 na následující stránce.



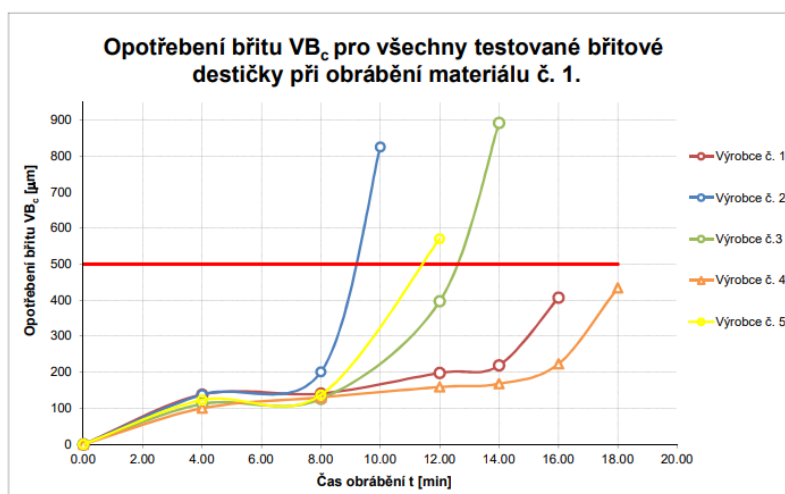
Obr. 65: Graf opotřebení břitu KF pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25]

Jak bylo zmíněno v minulém odstavci, tak pro nástroj č. 2 na obr. 66 překročil velikost KB (velikost opotřebení ve tvaru žlábků) už v 10. minutě, což znamená, že nástroj se už dále nesmí používat pro obrábění. Co se týče nástroje č. 4, tak i v tomto případě je po celou dobu zkoušky konstantní.



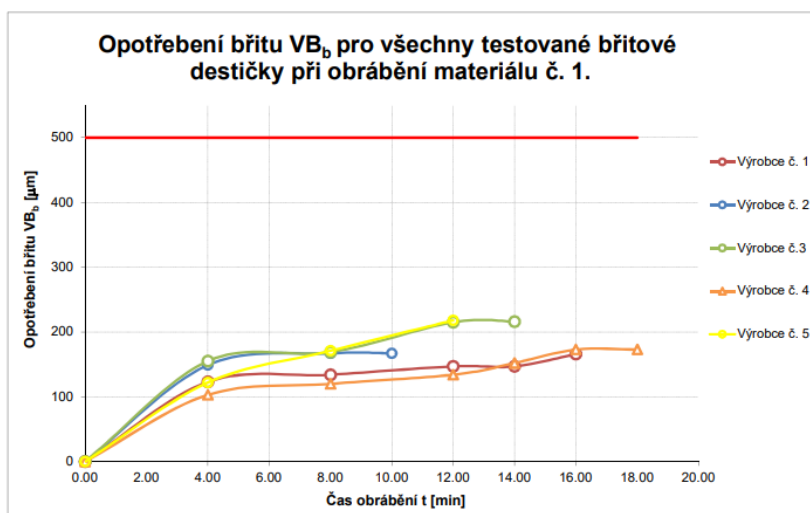
Obr. 66: Graf opotřebení bříty KB pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25]

Na obr. 67 lze vidět, že nástroj č. 2, nástroj č. 5 a nástroj č. 3 překročily „červenou čáru“ tzv. hraniční čáru, která značí, že po překročení se už nástroj dále nesmí používat. Ale to neznamená, že když je hodnota opotřebení menší než 500 mikrometrů, tak se dále smí používat. Ze zkoušky trvanlivosti se zjistilo, že pro nástroj č. 4 při 18. minutě byla hodnota opotřebení v oblasti špičky nástroje 434 mikrometrů a dále se s tímto nástrojem už nesmělo obrábět. Tedy hodnoty nad 500 mikrometrů už značí extrém.



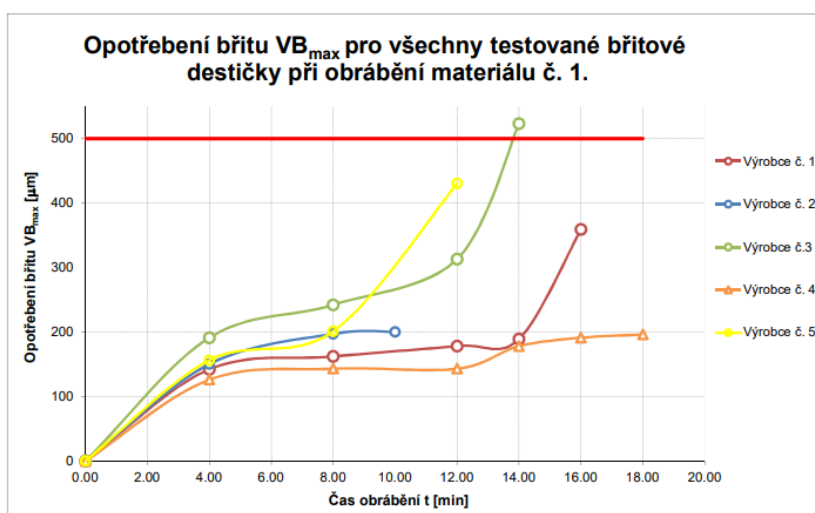
Obr. 67: Graf opotřebení bříty VB_c pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25]

Opotřebení břitu VB_b neboli opotřebení přímé části hřbetu (průměrný) se pro všechny nástroje pohybuje v daném rozmezí mezi 100 až 220 mikrometrů, viz obr. 68.



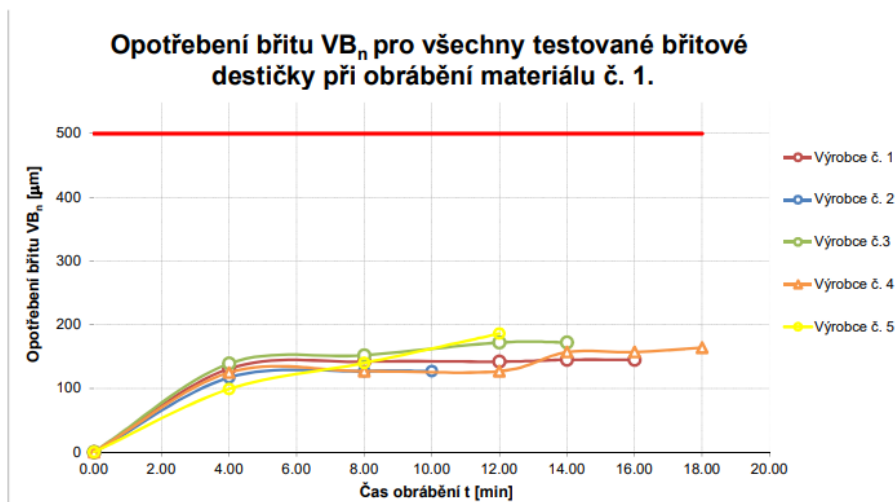
Obr. 68: Graf opotřebení břitu VB_b pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25]

Maximální opotřebení na hřbetě, (viz obr. 69) dosáhlo nástroj č. 3, kde překročil hraniční čáru 500 mikrometrů v čase 14. minutách. Nástroj č. 5 ve 12. minutě dosahovalo hodnoty nad 400 mikrometrů, ale jak se zjistilo na obr. 67, tak nástroj č. 5 překročilo hraniční čáru u opotřebení břitu VB_c . Nástroj č. 4 je stále po celou dobu zkoušky konstantní.



Obr. 69: Graf opotřebení břitu VB_{max} pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25]

Na obr. 70 lze vidět, jak se vyvíjelo opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě nástroje pro všechny vybrané nástroje. Z obr. je vidět, že opotřebení pro všechny nástroje se pohybuje v rozmezí 100 až 200 mikrometrů.



Obr. 70: Graf opotřebení břitu VB_n pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25]

Tedy závěrem zkoušky trvanlivosti nástroje ukazuje, že největší opotřebení při obrábění materiálu č. 1 s nástrojem č. 4 je opotřebení v oblasti špičky nástroje a opotřebení ve tvaru žlábků na čele nástroje.

Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na analýzu nástrojů pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Provedl jsem rozbor problematiky z oblasti obrábění, konkrétně soustružení skupiny materiálů ISO – S. V práci jsou zmapovány jednotlivé těžkoobrobitelné materiály, konkrétně pro skupinu materiálů ISO - S, tedy vlastnosti niklových, kobaltových a titanových slitin, obrobitelnost těchto slitin, oblasti použití a vhodné rezné materiály pro obrábění těchto slitin. Dále je část práce věnována přímo procesu obrábění. Je zde popsána geometrie rezného nástroje, vhodné rezné podmínky pro obrábění, rezné materiály, tvorba třísky, silové jevy a také tepelná bilance procesu řezání. V práci se dále uvádí pojmy jako je trvanlivost nástroje a opotřebení rezného nástroje, které jsou součástí technologické zkoušky na závěru práce. V neposlední řadě je v práci přehled vybraných destiček od známých firem, které vyrábí rezné nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů.

Závěr práce slouží technologickým zkouškám, které jsou realizovány za předem stanovených rezných podmínek a parametrů. Z důvodu stanovených podmínek s firmou, se v práci nesmí uvádět jakékoliv identifikační znaky (tzn.: výrobce, označení rezného materiálu nebo geometrie, apod.). V práci tedy pouze uvádím např. označení vzorek č. 1, zkouška č. 1, apod. Dále bych chtěl podotknout, že druhá část zkoušky (trvanlivost nástroje), byla zpracována z částí Ústavem výrobních strojů a zařízení RCMT Horská.

Zkouška se člení na dvě části, první část se zabývá zkoumáním tvorby třísky při obrábění materiálu č. 1 za použití rezného nástroje č. 1. Výsledek této zkoušky je, že při zvyšování rezných podmínek, v tomto případě při zvyšování hloubky řezu a_p a posuvu na otáčku f_{ot} nám vzniká tzv. elementární segmentová tříska. Druhá část zkoušky je věnována zkouškou trvanlivosti rezného nástroje, konkrétně se zde zkoumají typy a velikosti opotřebení rezného nástroje č. 1 vznikající při obrábění materiálu č. 1 v závislosti na čas t . V následující tabulce na další stránce jsou výsledky této zkoušky. Z tabulky lze vidět, že průběh zkoušky trval 18 minut. Dále nástroj už nebyl vhodný pro další proces obrábění. Nejčastější opotřebení vzniklo v podobě žlábků na čele nástroje KB , opotřebení vrubové na hřbetě nástroje, ale především největší opotřebení se vyskytovalo v oblasti špičky rezného nástroje.

Tab. 12: Shrnutí výsledků trvanlivosti [25]

T_1 [min]	KF [μm]	KB [μm]	KT [μm]	VB_c [μm]	VB_b [μm]	VB_{\max} [μm]	VB_n [μm]
0.00	0	0		0	0	0	0
4.00	103	1039		100	103	126	125
8.00	103	1045		130	120	143	127
12.00	94	1045		159	134	143	127
14.00	94	1065		168	152	178	157
16.00	92	1080		223	173	191	157
18.00	92	1092		434	173	196	164
20.00							

Shrnutí poznatků z práce:

Pro řezné nástroje při obrábění těžkoobrobitelných materiálů se doporučuje používat ostrý pozitivní břit a velký úhel hřbetu. Zaoblení špičky by mělo být co nejmenší.

Řezné podmínky pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů by měly být následující: hloubka řezu by se měla pohybovat v rozsahu $a_p = 0,5$ až 30 mm, posuv na otáčku $f = 0,1$ až 2 mm/otáčku a řezná rychlost $v_c = 40$ až 60 mm/min. Při obrábění se doporučuje používat řeznou kapalinu, například roztoky na vodní bázi nebo emulzní kapaliny jako je olej. Je třeba dbát na to, aby byl dostatečný tlak přívodu kapaliny do místa řezu, z důvodu vzniku vysokého teplotního pole během procesu obrábění.

Pro obrábění, konkrétně soustružení materiálů skupiny ISO - S se volí nejčastěji nástroje ze slinutých karbidů, řezné keramiky nebo kubický nitrid bóru. Nejlepší vlastnosti má kubický nitrid bóru, ale z hlediska ekonomické stránky je kubický nitrid bóru nevhodný a tudíž se volí druhá volba a to je řezná keramika. Poslední volbou jsou slinuté karbidy, jelikož mají o něco menší tepelnou odolnost než řezná keramika.

Pro těžkoobrobitelné materiály skupiny ISO – S platí utváření segmentovaných třísek. Tvorba segmentů třísky začíná počátečním kontaktem nože s tvořícím segmentem, který je značně krátký a délka styku kontaktu roste s pohybem nože. Dochází k intenzivnímu přenosu tepla do kontaktní zóny nože, což velmi často zapříčiňuje k urychlení opotřebení nože.

Získané výsledky byly zpracovány pro objasnění procesu soustružení skupinu materiálů ISO – S a mohou sloužit jako podklady pro rozšíření poznatků a dalších studií. Je však nutné pokračovat v experimentálních činnostech, neboť některé oblasti nebyly ještě dostatečně probádány. Mezi tyto oblasti bych zařadil například měření zbytkových napětí v různých hloubkách, obrábění za použití tvrdých řezných nástrojů (PKD, CBN) s kvalitním (vysokotlakým) přívodem kapaliny, aplikace metody plánovaných experimentů na obrábění těžkoobrobitelných slitin a stanovení vhodných podmínek obrábění.

Použité a doporučené zdroje

- [1] KOČMAN K. TECHNOLOGICKÉ PROCESY OBRÁBĚNÍ. Vydáno v Brně: Akademické nakladatelství CERM, 2011.
- [2] FOREJT M. TEORIE OBRÁBĚNÍ, TVÁŘENÍ A NÁSTROJE. Vydáno v Brně: Akademické nakladatelství CERM, 2006.
- [3] HUMÁR, A. Technologie I: Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory magisterskou formu studia. 1. vyd. Brno: VUT Brno. 2003, 138 s.
- [4] HUMÁR, A. Technologie I: Technologie obrábění – 2. část. Studijní opory magisterskou formu studia. 1. vyd. Brno: VUT Brno. 2004, 138 s.
- [5] MÁDL J. ZÁKLADY TECHNOLOGIE II. vydáno v Praze: České vysoké učení technické, 2008.
- [6] JERSÁK J. TEPLA A TEPLoty PŘI OBRÁBĚNÍ, OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ. Vydáno v Liberci: Technologie III – obrábění.
- [7] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-v-oblasti-kapalin-pro-obrabeni>
- [8] METAL CUTTING TECHNOLOGIES. Technologické možnosti. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/technologicke-moznosti/page/2/>
- [9] PREZENTACE: Technologie II. České vysoké učení technické v Praze.
- [10] MÁDL J. TEORIE OBRÁBĚNÍ – Ediční středisko ČVUT, Praha 6, Zikova 4, 1990.
- [11] ŘASA, Jaroslav a Vladimír G. Strojírenská technologie 3. 1. vyd. Praha: Scientia, 2000, 256 s. ISBN 8071832073
- [12] NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY – Předmět: Nástroje a procesy obrábění. Mendelova univerzita v Brně. Doc. Ing. Zdeněk K., CSc. Vyd.: 8. 7. 2016, Brno.
- [13] HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [14] KRATOCHVÍL B., Švorčík V., Vojtěch D. Úvod do studia materiálů. 1. vydání. ISBN 80-7080-568-4. 2005.
- [15] AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění – Kniha pro praxe. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o. 1997. 857 s. Přeloženo z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6
- [16] KOČMAN, Karel. Speciální technologie. Obrábění. 2. přeprac. vyd. Brno: PC-DIR Real, 1993, 213 s. ISBN 80-214-1187-2.

- [17] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 1. vyd. Brno: CERM, c1999, 350 s. ISBN 80-720-4130-4.
- [18] Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. MM průmyslové spektrum [online]. 18. 6. 2003. Dostupný zde: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2>
- [19] MALOTOVÁ, Š. Příspěvek k hodnocení trvanlivosti řezných nástrojů při upichování korozivzdorných ocelí. Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB – TU Ostrava, 116 s., 57 obrázků, 17 tabulek, 3 přílohy. Disertační práce, Ostrava, 2019. Školitel: prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.
- [20] SEDLÁČEK, Vladimír. Neželezné kovy a slitiny. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1979, 398 s.
- [21] YOUSSEF, H. A. Machining of Stainless Steels and Super Alloys:: Traditional and Nontraditional Techniques. 1. United Kingdom: John Wiley, 2016, 292 s. ISBN 9781118919569.
- [22] VOJTĚCH, Dalibor. Kovové materiály. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1.
- [23] KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [24] SKRIPTA, Technologie II, 1. díl [online]. Dostupné zde: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [25] Interní zdroje a dokumenty společnosti Dormer Pramet
- [26] DAVIM, J. P. Machinability of Advanced Materials. 1. United Kingdom: John Wiley, 2014, 241 s. ISBN 978-1-84821-396-8.
- [27] Keramika [online]. Dostupné zde: <https://www.opi.zcu.cz/download/rezna%20keramika08-09.pdf>
- [28] Pramet Tools s.r.o., katalog - soustružení 2021-2022. 318s.
- [29] Nikl a jeho slitiny, titan a jeho slitiny (katalog). Západočeská univerzita v Plzni, Oddělení povrchové inženýrství. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf
- [30] Stellite | Weapons | US Ordnance. US Ordnance | M2 MK43 M60 M240 | Defense Systems Manufacturing [online]. Dostupné z: <http://www.usord.com/weapons/stellite>

- [31] Nickel Alloy Inconel 718 – Properties and Applications by United Performance Metals, 14. 11. 2008. [online]. Dostupné zde: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4459>
- [32] TiAl6V4 (Grade 5) High Performance Alloys Data Sheet. ISO 9001. Zapp Precision Metals GmbH. [online]. Dostupné zde: https://www.zapp.com/fileadmin/_documents/Downloads/materials/high_performance_alloys/en/TiAl6V4-Grade5-Datasheet.pdf
- [33] SANDVIK COROMANT, Nástrojové třídy a břitové destičky pro soustružení titanu a žárovzdorných slitin (HRSA) [online]. Dostupné zde: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/turning-inserts-grades-titanium-hrsa/pages/default.aspx>
- [34] SANDIVK COROMANT. Nástrojové třídy a břitové destičky pro soustružení korozivzdorných ocelí [online]. Dostupné zde: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/turning-inserts-grades-stainless-steel/pages/default.aspx>
- [35] KENNMETAL. Negativní břitové destičky, DNMG-RP [online]. Dostupné zde: <https://www.kennametal.com/cz/cs/products/fam.negative-inserts-dnmg-rp.100002400.html#tad>
- [36] SECOTOOLS. Břitové destičky pro všeobecné soustružení [online]. Dostupné zde: https://www.secotools.com/article/m_7100
- [37] WALTER-TOOLS. Soustružení [online]. Dostupné zde: <https://www.walter-tools.com/cs-cz/search/pages/default.aspx/turning?r=%7B%22Taxonomy%22:%5B%22turning%22%5D,%22PossibleForImg%22:%5B%22S%22%5D%7D>
- [38] ISCAR, katalog – soustružnické nástroje [online]. Dostupný zde: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/lang/cs/newarticleid/2393>
- [39] TRIVEDI, Dipeshkumar Bansilal. Machining of difficult-to-cut Super alloys: A Review. International Journal of Advance Engineering and Research 71 Development. 2017, 4(10), 120-125. ISSN 2348-4470. Dostupné z: doi:10.21090/ijaerd.52509

Seznam obrázků

Obr. 1: Plochy na obrobku [3]	12
Obr. 2: Základní pohyby při soustružení [1].....	13
Obr. 3: Vektory pohybů při soustružení a) podélné soustružení válcové plochy b) příčné soustružení čelní plochy [5].....	13
Obr. 4: Použití žáruvzdorných a žárupevných niklových slitin [29]	15
Obr. 5: Blackbird - celotitanová konstrukce [29]	18
Obr. 6: Části, plochy a ostří na řezné části soustružnického nože [24]	23
Obr. 7: Špička nástroje [24].....	23
Obr. 8: Nákres břitů [vlastní archiv].....	24
Obr. 9: Roviny nástrojové souřadné soustavy soustružnického nože [24]	25
Obr. 10: Vznik třísky tvářené (vlevo) a třísky netvářené (vpravo) [10].....	27
Obr. 11: Rozdělení třísek [10]	28
Obr. 12: Plynulá tříska – fotografie	29
Obr. 13: Člankovitá tříska – fotografie.....	29
Obr. 14: Elementární tříska – fotografie.....	30
Obr. 15: Oblasti plastické deformace, 1 - primární, 2 - sekundární, 3 - terciální [10] ...	30
Obr. 16: Tvorba segmentované třísky během obrábění titanové slitiny [26]	31
Obr. 17: Vliv řezné rychlosti na oblast primární plastické deformace [10]	32
Obr. 18: Rozklad řezné síly na aktivní a pasivní složky [10].....	34
Obr. 19: Rozklad síly při ortogonálním řezání [10].....	34
Obr. 20: Síly při vázaném řezání [10].....	36
Obr. 21: Teplo třísky, obrobku a břitů nástroje v závislosti na řezné rychlosti [6]	37
Obr. 22: Max. teplota v určité vzdálenosti ostří [10].....	38
Obr. 23: Max. teplota na ostří nástroje [10].....	38
Obr. 24: Závislost opotřebení na čase při různých řezných rychlostech [24].....	39
Obr. 25: Zlogaritmovaný diagram T-vc [24]	40
Obr. 26: Chlazení emulzní kapalinou při frézování [8].....	41
Obr. 27: Chlazení olejem při odvalovacím frézování [7]	41
Obr. 28: Opotřebení hřbetu nástroje [28].....	42
Obr. 29: Výmol na čele [28]	43
Obr. 30: Oxidační rýha na vedlejším břitu [28].....	43
Obr. 31: Plastická deformace špičky [28].....	44

Obr. 32: Tvorba nárůstku [28]	44
Obr. 33: Vrubové opotřebení hřbetu [28]	44
Obr. 34: Křehké porušení břitu [28]	45
Obr. 35: Křehké porušení břitu na konci záběru [28]	45
Obr. 36: Křehké porušení v oblasti špičky [28]	45
Obr. 37: Tvorba trhlin [28]	46
Obr. 38: SK skupiny P [3]	48
Obr. 39: SK skupiny M [3]	48
Obr. 40: Hrubozrný SK skupiny K [3]	49
Obr. 41: Jemnozrný SK skupiny K [3]	49
Obr. 42: Jednovrstvý povlak [15]	50
Obr. 43: Dvouvrstvý povlak [15]	51
Obr. 44: Vícevrstvý povlak [15]	51
Obr. 45: Základní vlastnosti vybraných povlaků [3]	52
Obr. 46: Oblast vhodného utváření třísek [28]	57
Obr. 47: Břítová destička CNMG [28]	57
Obr. 48: VBD GC2025 [34]	58
Obr. 49: VBD S205 [33]	58
Obr. 50: Negativní břítová destička DNMG-RP [35]	59
Obr. 51: VBD CNMG120402-FM5 WSM10S	60
Obr. 52: Utváření třísek - $ap = 0,5$, materiál č. 1 [25]	64
Obr. 53: Utváření třísek - $ap = 1$, materiál č. 1 [25]	64
Obr. 54: Utváření třísek - $ap = 2$, materiál č. 1 [25]	65
Obr. 55: Utváření třísek - $ap = 3$, materiál č. 1 [25]	65
Obr. 56: Utváření třísek - $ap = 4$, materiál č. 1 [25]	66
Obr. 57: Graf vhodného utváření třísky materiálu č. 1 [25]	66
Obr. 58: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při $t = 0$ min.[25]	67
Obr. 59: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při $t = 4$ min.[25]	68
Obr. 60: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při $t = 8$ min.[25]	68
Obr. 61: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při $t = 12$ min.[25]	69
Obr. 62: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při $t = 14$ min.[25]	69
Obr. 63: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při $t = 16$ min.[25]	70
Obr. 64: Fotografie čela a hřbetu nástroje č. 4 při $t = 18$ min.[25]	70

Obr. 65: Graf opotřebení břitu KF pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25]	71
Obr. 66: Graf opotřebení břitu KB pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25]	72
Obr. 67: Graf opotřebení břitu VBc pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25].....	72
Obr. 68: Graf opotřebení břitu VBb pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25].....	73
Obr. 69: Graf opotřebení břitu VBmax pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25].....	73
Obr. 70: Graf opotřebení břitu VBn pro 5 různých nástrojů při obrábění materiálu č. 1 [25].....	74

Seznam tabulek

Tab. 1: Chemické složení materiálu INCONEL 718 [31]	17
Tab. 2: Praktické aplikace kobaltových slitin [vlastní archiv].....	17
Tab. 3: Obsah chemických prvků v jednotlivých typech slitin [32]	20
Tab. 4: Vlastnosti řezných materiálů [27]	54
Tab. 5: Startovní řezné podmínky pro dané destičky [28].....	57
Tab. 6: Doporučené řezné podmínky pro vybrané VBD pro soustružení titanu a žárovzdorných ocelí [33]	58
Tab. 7: Doporučené řezné podmínky pro vybrané VBD pro soustružení korozivzdorných ocelí [34].....	59
Tab. 8: Doporučené řezné podmínky pro jednotlivé VBD pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů [36].....	60
Tab. 9: Vybrané VBD a jejich doporučené řezné podmínky [37]	61
Tab. 10: Vybrané VBD pro obrábění materiálů skupiny S [38].....	61
Tab. 11: Velikosti opotřebení v závislosti na čas t [25].....	71
Tab. 12: Shrnutí výsledků trvanlivosti [25]	76