

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství

Studijní specializace: Strojírenská technologie - technologie
obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zvyšování životnosti nástroje při obrábění korozivzdorných ocelí

Autor: Adam LUKÁŠ

Vedoucí práce: Ing. Jindřich SÝKORA

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Adam LUKÁŠ**
Osobní číslo: **S19B0358P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **Zvyšování životnosti nástroje při obrábění korozivzdorných ocelí**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Analýza současného stavu
3. Zhodnocení a návrh vlastního řešení
4. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- STANĚK, Jiří a Jiří NĚMEJC. *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-363-9.
- HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- Elektronické informační zdroje dostupné z <https://www.knihovna.zcu.cz/>
- Sandvik Coromant, dostupné z <https://www.sandvik.coromant.com/>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jindřich Sýkora**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Luboš Kroft, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Zde bych rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Jindřichu Sýkorovi za projevenou ochotu, rady a připomínky v celém průběhu tvorby práce. Dále Ing. Luboši Kroftovi, Ph.D. a zaměstnancům RTI za pomoc při experimentu. Také bych chtěl poděkovat rodině za podporu v celém průběhu studia.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Lukáš	Jméno Adam	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulu) Ing. Sýkora	Jméno Jindřich	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Zvyšování životnosti nástroje při obrábění korozivzdorných ocelí		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	55	TEXTOVÁ ČÁST	37	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce se zabývá tématem zvyšování životnosti nástroje při obrábění korozivzdorných ocelí. Jsou rozebrány druhy těchto ocelí a jejich vlastnosti. Důraz je dán na jev deformačního zpevňující, nízkou tepelnou vodivost a s tím související opotřebení nástroje. V rámci experimentu je následně porovnána životnost nástroje při použití konvenčního a optimalizovaného přívodu řezné kapaliny.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Korozivzdorné oceli, obrábění, nástroje, opotřebení nástroje, řezná prostředí

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Lukáš	Name Adam		
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Sýkora	Name Jindřich		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Increasing tool service life when machining stainless steel			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	55	TEXT PART	37	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor's thesis deals with the topic of increasing tool service life when machining stainless steel. The types of these steels and their properties are analysed. Emphasis is placed on the work hardening phenomenon, low thermal conductivity, and related tool wear. The experiment compares tool life when conventional and optimized cutting fluid supplies are used.
KEY WORDS	Stainless steel, machining, tools, tool wear, cutting fluids

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	7
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
1 Úvod.....	11
2 Analýza současného stavu.....	13
2.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí	13
2.1.1 Dle struktury.....	13
2.1.1.1 Austenitické	13
2.1.1.2 Martenzitické (Kalitelné).....	14
2.1.1.3 Feritické	15
2.1.1.4 Dvoufázové (duplexní)	16
2.1.1.5 Precipitačně vytvrditelné.....	17
2.1.2 Dle chemického složení.....	18
2.1.2.1 Chromové.....	18
2.1.2.2 Chromniklové	18
2.1.2.3 Chrommanganové	18
2.2 Značení korozivzdorných ocelí.....	18
2.2.1 Podle ISO	18
2.2.2 Podle EN 10027-1 a EN 10027-2.....	19
Podle AISI.....	20
2.3 Ochrana proti korozi.....	20
2.4 Tvorba třísky.....	21
2.4.1 Oblast primární plastické deformace.....	21
2.4.2 Oblast sekundární plastické deformace	22
2.4.3 Oblast terciální plastické deformace	22
2.4.4 Deformační zpevnění obráběného materiálu.....	22
2.4.5 Tvorba a odvod tepla vzniklého při obrábění.....	24
2.5 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí	26
2.5.1 Obrobitelnost martenzitických ocelí	28
2.5.2 Obrobitelnost feritických ocelí.....	28
2.5.3 Obrobitelnost austenitických ocelí	28
2.5.4 Korozivzdorné oceli se zlepšenou obrobitelností.....	30
2.6 Opotřebení nástroje.....	31
2.6.1 Opotřebení ve tvaru nárůstku	32

2.6.2	Opotřebení ve tvaru vrubu.....	32
2.6.3	Opotřebení ve tvaru výmolu na čele.....	33
2.6.4	Opotřebení ve tvaru plastické deformace břitu	33
2.7	Řezná prostředí	34
2.7.1	Požadované vlastnosti řezných prostředí	34
2.7.2	Rozdělení řezných prostředí.....	35
2.7.2.1	Plynná	35
2.7.2.2	Kapalná	35
2.7.2.3	Pevná maziva	36
2.7.3	Přívod řezné kapaliny	36
3	Zhodnocení a návrh vlastního řešení.....	38
3.1	Experiment.....	38
3.1.1	Nástroje	38
3.1.2	Vyměnitelná břitová destička.....	39
3.1.3	Polotovár	40
3.1.4	Podmínky experimentu	40
3.1.5	Stroj	40
3.1.6	Měření a vyhodnocení opotřebení VBD	41
3.1.7	Test 1	42
3.1.8	Test 2	43
3.1.9	Test 3.....	44
4	Závěr.....	47
	Seznam použitých zdrojů	48

Přehled použitých zkratk a symbolů

Zkratka, symbol	Význam	Jednotka
AISI	American Iron and Steel Institute	[-]
a_p	Hloubka řezu	[mm]
CBN	Cubic boron nitride – kubický nitrid boru	[-]
ČSN	Česká technická norma	[-]
EN	Evropská norma	[-]
FCC	Face centered cubic – Plošně centrovaná kubická mřížka	[-]
f_{ot}	Posuv na otáčku	[mm/ot.]
HRC	Tvrdomost podle Rockwella C	[-]
ISSF	International Stainless Steel Forum	[-]
ISO	International Organization for Standardization – Mezinárodní organizace pro normalizaci	[-]
JIS	Japanese Industrial Standards – Japonské průmyslové normy	[-]
MQL	Minimum quantity lubrication – mazání minimálním množstvím maziva	[-]
MTCVD	Middle Temperature Chemical Vapour Deposition – středně teplotní povlakování CVD	[-]
PREN	Pitting resistance equivalent number – index odolnosti proti bodové korozi	[-]
R_a	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	[μ m]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
RTI	Regionální technologický institut	[-]
SNOP	Stroj, nástroj, obrobek, přípravek	[-]
SK	Slinutý karbid	[-]
t_c	Tloušťka třísky po řezu	[mm]
t_0	Tloušťka třísky před řezem	[mm]
VB	Opotřebení na hřbetě	[mm]
VB_B	Opotřebení na hřbetě v oblasti přímé části ostří (průměrné)	[mm]

$VB_{Bkrit.}$	Opotřebení na hřbetě v oblasti přímé části ostří (kriteriální)	[mm]
$VB_{Bmax.}$	Opotřebení na hřbetě (maximální)	[mm]
VB_C	Opotřebení na hřbetě v oblasti špičky nástroje	[mm]
VB_N	Opotřebení na hřbetě ve formě vrubu	[mm]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]
v_c	Řezná rychlost	[m/min]
x	Tloušťka pasivační vrstvy	[μ m]
α	Úhel hřbetu	[°]
γ	Úhel čela	[°]
δ	Úhel řezu	[°]
Φ	Úhel roviny stříhu	[°]
K_r	Úhel nastavení hlavního ostří	[°]

Seznam obrázků

Obrázek 1: Celosvětový hmotnostní objem produkce korozivzdorných ocelí v letech 2005 až 2020 (tisíce tun) [3].....	11
Obrázek 2: Schaefflerův diagram[6].....	13
Obrázek 3: Mikrostruktura austenitické oceli AISI 304 [8].....	14
Obrázek 4: Mikrostruktura martenzitické korozivzdorné oceli po kalení a popouštění [11]...	15
Obrázek 5: Prostorově centrovaná mřížka železa alfa [12].....	16
Obrázek 6: Struktura austeniticko-feritické oceli (64 % austenitu, 36 % feritu) [16].....	17
Obrázek 7: Schéma průběhu pasivace (vytvořeno podle [23] a [24]).....	20
Obrázek 8: Deformační oblasti (podle [29], upraveno)	21
Obrázek 9: Vliv úhlu řezu na oblast primární plastické deformace [30]	22
Obrázek 10: Vliv úhlu hřbetu na tvrdost a hloubku zpevněné vrstvy [32]	23
Obrázek 11: Vliv otupení nástroje na hloubku zpevnění obráběného povrchu 1 – ostrý nástroj; 2 – otupený nástroj [30]	23
Obrázek 12: a) Vliv posuvu na hloubku zpevnění b) Vliv přísuvu na hloubku zpevnění (podle [30]).....	24
Obrázek 13 Rozdělení odvedeného tepla [34]	24
Obrázek 14: Vliv tloušťky odebrané třísky t_c na úhel Φ střižné roviny.....	25
Obrázek 15: Základní rozdělení obráběných materiálů dle ISO [38]	26
Obrázek 16: Závislost řezné rychlosti na hodnotě PREN pro danou trvanlivost nástroje [28]	27
Obrázek 17: Porovnání obrobitelnosti korozivzdorných ocelí [9].....	27
Obrázek 18: Vliv řezné rychlosti na tloušťku třísky (podle [51], upraveno).....	29
Obrázek 19: Oblast uspokojivé obrobitelnosti [49]	31
Obrázek 20: Opotřebení ve tvaru vrubu (foto autor), zvětšeno 100x.....	32
Obrázek 21: Průběh opotřebení nástroje (podle [67], upraveno)	33
Obrázek 22: Základní rozdělení řezných prostředí (vytvořeno na základě [72] a [73])	35
Obrázek 23: Směry přívodu kapaliny při ortogonálním řezání (podle [74], upraveno).....	37
Obrázek 24: a) Nástroj s konvenčním přívodem kapaliny; b) Nástroj s vnitřním přívodem kapaliny (foto autor).....	38
Obrázek 25: Schéma vnitřního přívodu řezné kapaliny nástrojem [85].....	39
Obrázek 26: Specifikace použité VBD (vytvořeno podle [86] a [87]).....	39
Obrázek 27: Pracovní prostor stroje DMG MORI CTX BETA 1250 TC (foto autor)	41
Obrázek 28: Opotřebení hřbetu nástroje podle ISO 3685 [90]	41
Obrázek 29: Test 2 – destrukce břitu VBD nástroje s vnitřním chlazením po 7. řezu (zvětšeno 100x); foto autor.....	44
Obrázek 30: Graf závislosti míry opotřebení hřbetu na použitém chlazení; $v_c = 250$ m/min...	46

Obrázek 31: Test 3 – opotřebení VBD nástroje s vnitřním chlazením; a) po 2. řezu; b) po 12. řezu (zvětšeno 100x); foto autor..... 46

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vybrané mechanické vlastnosti oceli AISI 630 při pokojové teplotě [17]	18
Tabulka 2: Význam doplňkové číslice T [18]	19
Tabulka 3: Čísla skupin korozivzdorných, žáruvzdorných a žárupevných ocelí podle EN 10027-2 [21]	19
Tabulka 4: Struktura a třída obrobitelnosti pro soustružení u vybraných ocelí [39] [40] [41] .	26
Tabulka 5: Specifikace použité VBD	40
Tabulka 6: Složení oceli AISI 316 [89].....	40
Tabulka 7: Řezné podmínky experimentu.....	40
Tabulka 8: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 1 – nástroj s vnějším chlazením	42
Tabulka 9: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 1 – nástroj s vnitřním chlazením	42
Tabulka 10: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 2 – nástroj s vnějším chlazením	43
Tabulka 11: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 2 – nástroj s vnějším chlazením	43
Tabulka 12: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 3 – nástroj s vnějším chlazením	44
Tabulka 13: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 3 – nástroj s vnitřním chlazením	45

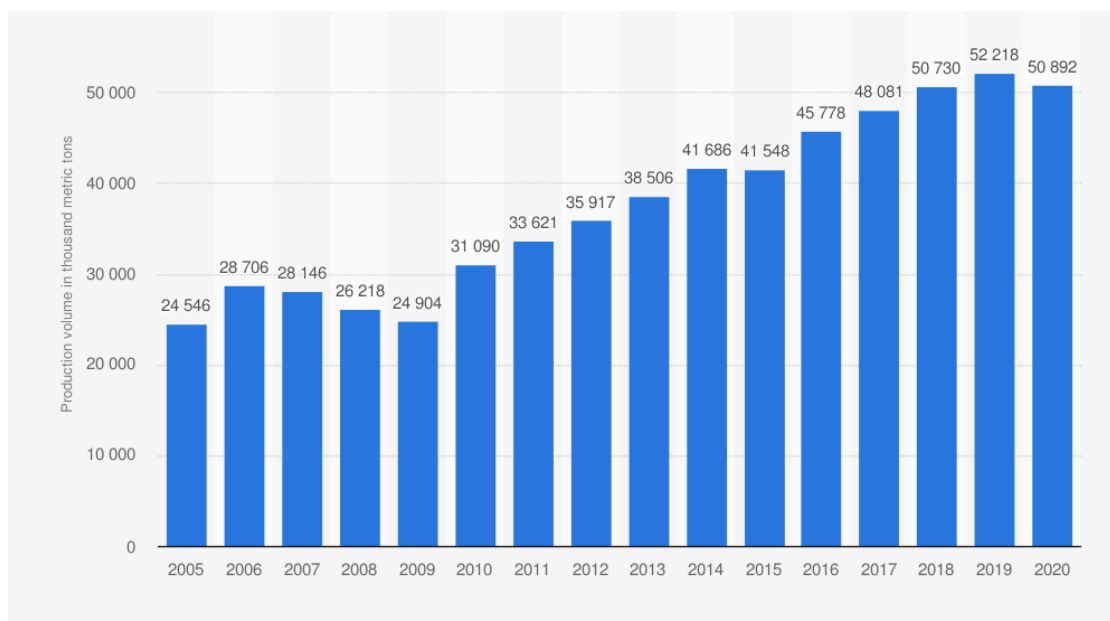
1 Úvod

Obrábění je technologický proces, při kterém se mechanickým, elektrickým či chemickým způsobem vytváří nový povrch na obrobku v požadované kvalitě, přesnosti a tvaru odebráním materiálu. Tradiční třískové obrábění je založeno na přetvoření materiálu do formy třísky za pomoci nástroje a jeho relativního pohybu a silového působení vůči obrobku. Základními činiteli při obrábění jsou stroj, nástroj, pracovní podmínky a obráběný materiál. Každý obráběný materiál, železný i neželezný, má svá specifika. Ocel jako slitina železa s uhlíkem má různé vlastnosti vlivem alotropie železa (schopnosti krystalovat ve více strukturách), možnosti umělého přidání prvků (tzv. legování) a tepelného zpracování. Proto mohou mít oceli značně odlišné fyzikální, chemické, mechanické i technologické vlastnosti.

Korozivzdorné oceli, často nepřesně označované za nerezové, jsou vysocelegované slitiny s často horšími vlastnostmi pro obrábění než nízkolegované oceli. To se projevuje rychlým opotřebením nástroje, které lze zpomalit použitím řezné kapaliny. Běžně je kapalina přiváděna kanálkem, který je mimo nástroj. To však neumožňuje její přesné nasměrování na nejvíce namáhané oblasti nástroje. Použitím vnitřku nástroje pro přívod kapaliny je možné směřovat kapalinu přesněji na kritická místa a zkrátit vzdálenost mezi výstupem a dopadem kapaliny na žádanou oblast. Výrobci takových nástrojů udávají zvýšení životnosti břitové destičky řádově o desítky procent.

Zvyšující se tlak na ochranu klimatu a současně růst celosvětové spotřeby elektrické energie vyžaduje přeměnu energetiky, s tím spojené použití odolnějších materiálů a přechod na čisté zdroje energie (větrná, solární, jaderná, geotermální a další). Právě korozivzdorné oceli jsou podle ISSF důležitou významné při použití těchto technologií. [1] Jejich vhodné použití může přes vyšší pořizovací cenu prodloužit životnost a zvýšit účinnost např. tepelných zařízení. Výhodou korozivzdorných ocelí je 100% recyklovatelnost, výrobce JinLing Steel uvádí, že 75 - 85 % těchto materiálů je znovu použito. [2]

Nenahraditelné vlastnosti korozivzdorných ocelí se stále více využívají i v dalších odvětvích jako jsou architektura, chemický a potravinářský průmysl i umění. Z dat ISSF vyplývá, že výroba korozivzdorných ocelí mezi roky 2005–2020 vzrostla více než dvojnásobně (Obrázek 1).



Obrázek 1: Celosvětový hmotnostní objem produkce korozivzdorných ocelí v letech 2005 až 2020 (tisíce tun) [3]

S rostoucí spotřebou se navyšují i požadavky na jejich efektivní výrobu a zpracování, v našem případě při obrábění lze vhodnou volbou parametrů nástroje, obráběcího stroje, řezných podmínek a prostředí dosáhnout delší trvanlivosti nástroje, vyšší produktivity, a tím snížení nákladů.

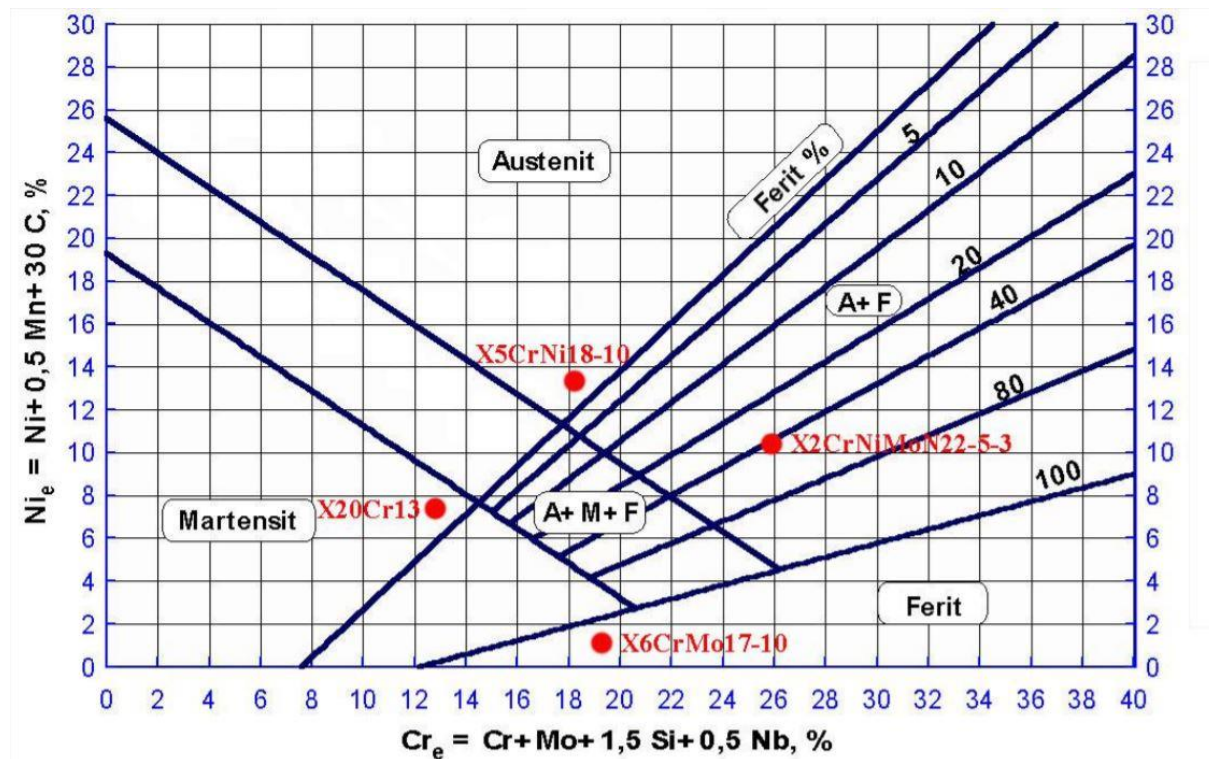
Cílem této bakalářské práce je uvést základní charakteristiku korozivzdorných ocelí s hlubším přesahem do vlastností při obrábění a s ním spojených problémů. Následně tyto problémy dále analyzovat vzhledem k možnostem jejich potlačení, nebo zmírnění jejich následků na řezný nástroj. Praktická část je věnována porovnání životnosti nástroje při vnějším a vnitřním přívodu řezné kapaliny.

2 Analýza současného stavu

Oceli se obecně považují za slitiny železa s uhlíkem. Oceli, do kterých je přidáno alespoň 12 % chromu se stávají korozivzdornými, tzn. odolnými proti chemickému působení okolního prostředí (např. vzduchu, vody, solí, kyselin či louhů). U takovýchto ocelí tedy není potřeba vytvářet speciální povrchové úpravy, jelikož si ochrannou bariéru proti koroznímu napadení vytvoří samy. Zmíněný obsah uhlíku je oproti jiným druhům ocelí u některých typů korozivzdorných ocelí nežádoucí z důvodu snížení odolnosti k mezikrystalové korozi. Z hlediska materiálů patří mezi korozivzdorné oceli i vysokolegované žáruvzdorné slitiny vhodné k použití v korozním prostředí při 600-1300 °C a také vysokolegované austenitické a chromové žárupevné oceli odolné proti tečení za tepla (creepu). [4]

2.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli se rozdělují v závislosti na chemickém složení nebo struktuře. Pro určení struktury se využívá Schaefflerova diagramu (Obrázek 2), kde vodorovná osa představuje chromový ekvivalent a svislá osa niklový ekvivalent. Z obrázku lze vyčíst, že se zvětšujícím se zastoupením tzv. feritotvorných prvků (chrom, molybden, křemík, niob aj.) se rozšiřuje oblast feritu. „Prvky, které rozšiřují a otevírají oblast austenitu a jejichž představitelem je nikl, nazýváme austenitotvornými. Dalšími prvky této skupiny jsou uhlík, dusík a také mangan a měď.“ [5]



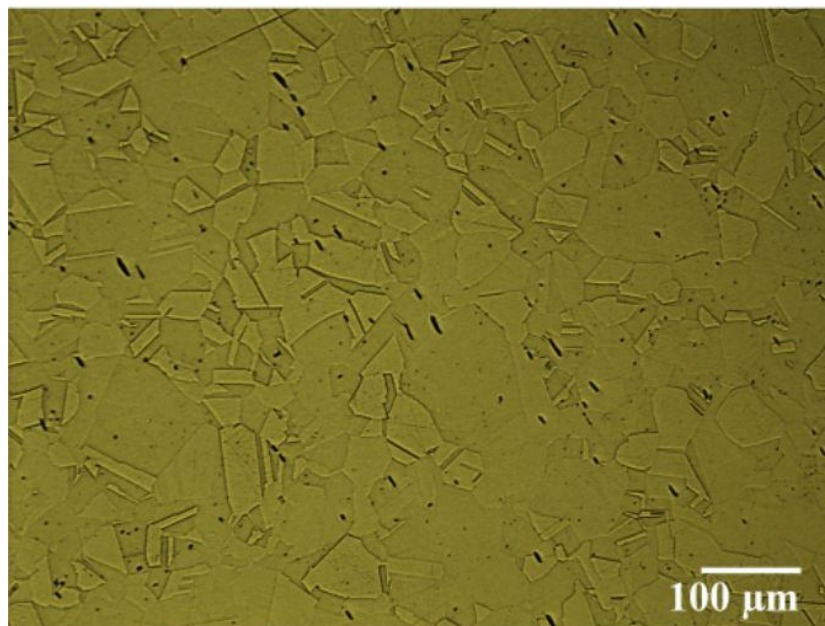
Obrázek 2: Schaefflerův diagram[6]

2.1.1 Dle struktury

2.1.1.1 Austenitické

Jsou nejpoužívanější skupinou korozivzdorných ocelí, kdy jejich typickým zástupcem je ocel AISI 304 (struktura viz Obrázek 3). Pro vznik austenitické fáze jsou legovány niklem, který je značně prodražuje. Snížení ceny lze dosáhnout použitím levnějšího manganu a dusíku

s podobnými vlastnostmi. Dusík zvyšuje pevnost, ale jakožto intersticiální prvek může způsobit nežádoucí zkřehnutí podobně jako vodík (viz martenzitické oceli). Zvýšený obsah dusíku je umožněn právě užitím manganu, který zlepšuje jeho rozpustnost. Obsah uhlíku je omezen na minimum, protože případný vznik karbidů chromu po hranicích zrn by způsobil zkřehnutí oceli. Austenitické oceli nelze zakalit, neboť fáze austenitu je stabilní i za teplot pod bodem mrazu. Martenzit však může vzniknout vlivem vysokého stupně protváření. Kubická plošně středěná (FCC) mřížka modifikace gama s 12 skluzovými rovinami a možností dvojčatění dodává materiálu vysokou houževnatost, která je vykoupena nižší mezí kluzu. Proto jsou austenitické oceli velmi dobře tvařitelné a často se používají na tažené potravinářské nádoby a do nízkých teplot, při kterých neztrácí mechanické vlastnosti. Stabilita austenitu je také výhodná pro svařování, nevzniká nebezpečí vzniku martenzitu a vzniklá napětí se rozprostírají do materiálu. Nízká tepelná vodivost a deformační zpevňování materiálu tepelně a abrazivně namáhají nástroj což přináší problémy při obrábění. Použití nalézají v chemickém, potravinářském průmyslu a architektuře. Nesmí se používat v prostředí síry, která by niklem legované oceli degradovala vznikem sulfidu nikelnatého. [4] [5] [7]

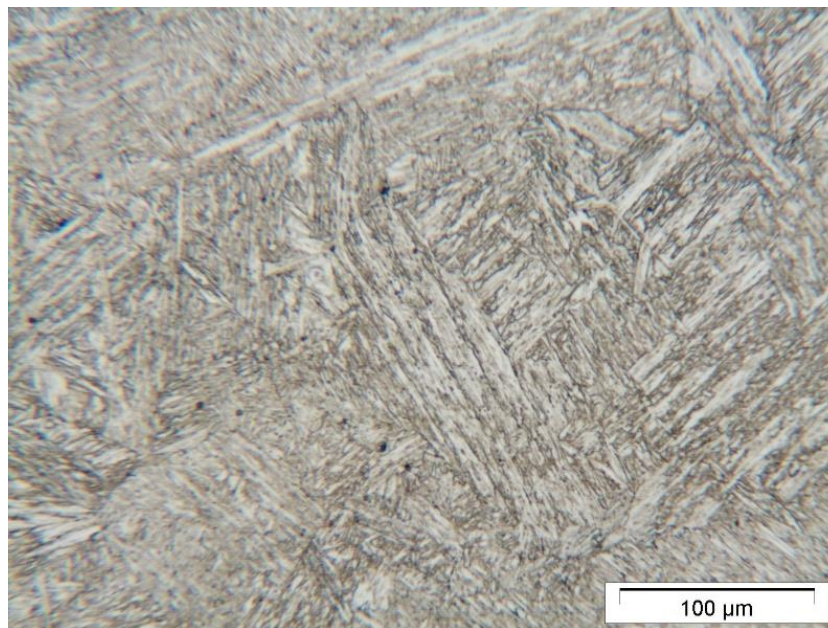


Obrázek 3: Mikrostruktura austenitické oceli AISI 304 [8]

2.1.1.2 Martenzitické (Kalitelné)

Oproti ostatním druhům obsahují až 1,5 % uhlíku, díky kterému se společně s chromem ocel stává samokalitelnou a je schopna získat martenzitickou strukturu. Ta materiálu dodává tvrdost a pevnost, naopak klesá houževnatost a tvařitelnost. Následné popouštění po zakalení však může vyvolat vznik nežádoucí tvrdé a křehké intermetalické fáze sigma, která výrazně zhoršuje houževnatost materiálu [4]. Vysoký obsah uhlíku snižuje odolnost proti korozi kvůli značné afinitě s chromem a následné tvorbě karbidů (Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3). Proto se využívá legování niklem a molybdenem, které posilují ochrannou oxidickou vrstvu na povrchu a nikl též podporuje tvorbu austenitu nutného pro zakalení. Nebezpečná je i přítomnost vodíku, který se do materiálu může dostat při tepelném zpracování nebo svařování. Svým pohybem dále zpevňuje materiál, soustřeďuje se do molekul v blízkosti trhlin a tím generuje mechanické napětí. Křehký martenzit není schopen plastickou deformací tyto trhliny pojmout, dochází k jejich růstu a značně se snižuje pevnost součásti. Martenzitické oceli se obvykle obrábí v netvrzeném stavu, ale lze je obrábět i ve stavu tvrzeném (po kalení a popouštění viz Obrázek 4). Navíc chromové korozivzdorné oceli lze před kalením a popouštěním nejprve žíhat naměkko. Tím se dosáhne

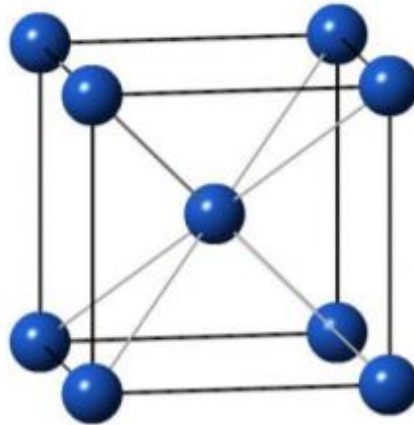
částečné přeměny na feritickou strukturu s karbidy o nižší tvrdosti, což je výhodné pro obrábění [5]. I z toho důvodu se tyto oceli zařazují do skupiny materiálů ISO P.[9] Samokolitelné niklové a manganové oceli, které nelze vyžíhat a chromové oceli v tvrzeném stavu vytvářejí značné nároky na odolnost nástroje [10] [5]. „Používají se hlavně na namáhané dílce v korozním prostředí (čerpadla, vodní turbíny) nebo na drobné nástroje (nůžky, chirurgické nástroje, žiletky, atd.).“[6]



Obrázek 4: Mikrostruktura martenzitické korozi-vzdorné oceli po kalení a popouštění [11]

2.1.1.3 Feritické

Zpravidla obsahují $\leq 0,1$ % uhlíku a 12–30 % chromu. Rozpustnost uhlíku ve feritu je značně omezená (do 0,01 %). Vyšší obsah má za následek vznik karbidů, které snižují houževnatost a v porovnání s ostatními strukturami mají feritické oceli nejnižší pevnost. Při zvýšeném obsahu chromu a tím odolnější pasivační vrstvě jsou odolné proti korozi pod napětím a také vhodné pro tepelně namáhané součásti (žáruvzdornost do 1100 °C). Nejsou legovány niklem, nebo jen minimálně, což vzhledem k růstu, nestabilitě a výši cen tohoto prvku zlepšuje dostupnost těchto ocelí jako alternativu typů založených na modifikaci gama. Železo alfa, na kterém je struktura postavena, krystaluje v krychlové prostorové centrované mřížce (Obrázek 5), která má až 48 skluzových systémů. Vzniklé dislokace si při tváření mohou začít vzájemně překážet, čímž dojde ke zpevnění materiálu. Proto jsou obvykle pro tváření a tažení vhodnější austenitické oceli, pokud nejsou požadovány specifické vlastnosti feritických (např. magnetismus pro indukčně ohřívání nádob). Při svařování a chladnutí z teplot nad 950 °C hrozí zkrěhnutí a zhrubnutí zrna, avšak ferit je stabilní, nepřemění se do austenitu a nehrozí zakalení. [4] [7]



Obrázek 5: Prostorově centrovaná mřížka železa alfa [12]

Feritické oceli s obsahem chromu do 13 % jsou nejlevnější korozivzdorné oceli. Zasahují i do oblasti austenitu, ze kterého může vzniknout martenzit. Kvůli nízkému obsahu chromu jsou vhodné pouze pro použití v mírně korozivním prostředí, např. atmosféry nebo vody, často jako součásti výfukového potrubí spalovacích motorů. Pro lepší vlastnosti se tyto oceli legují dalšími feritotvornými prvky, zejména titanem a niobem. Tím dojde ke stabilizaci feritu, ocel při ochlazení neupadá do martenzitu, což má pozitivní vliv na svařitelnost [4]. Titan zároveň zlepšuje houževnatost, korozivzdornost, a tvařitelnost. Použití nacházejí podobné jako 13% feritické oceli s tím, že nabízejí delší životnost. [5] [13]

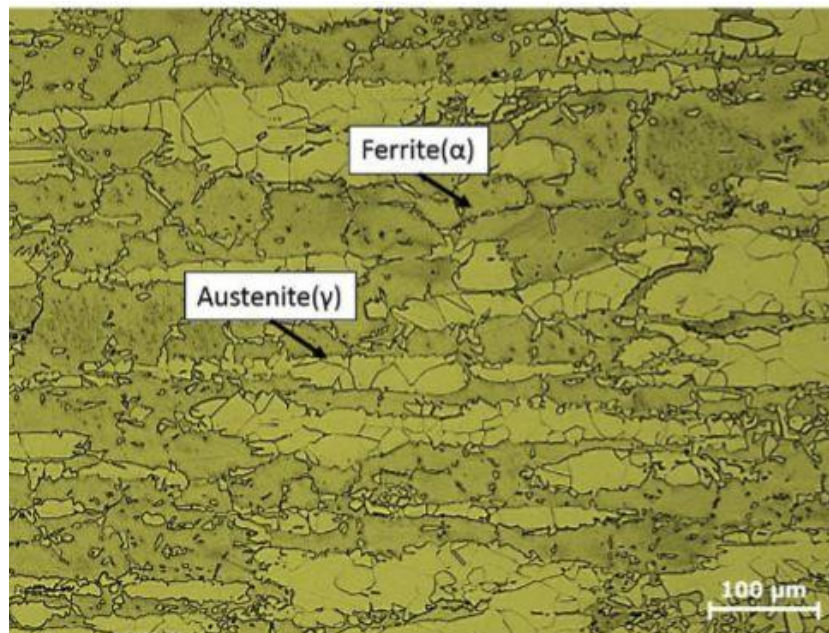
Jako superferity jsou označovány oceli s 18–29 % chromu a obsahem uhlíku pod 0,01 %. Přidáním 0,5–4 % molybdenu výrazně roste korozivzdornost v agresivních prostředích jako jsou kyseliny, chloridy, soli a síra.[5] [14]

2.1.1.4 Dvoufázové (duplexní)

Duplexní oceli propojují výše uvedené strukturní fáze a kombinují jejich vlastnosti. Typickým zástupcem jsou austeniticko-feritické oceli, kde se podíl feritu pohybuje zhruba mezi 30 až 50 % (příklad viz Obrázek 6). Zastoupení fází je závislé na chemickém složení a tepelném zpracování. Jejich cena je poměrně příznivá díky nízkému obsahu niklu. Přidání molybdenu a dusíku zlepšuje korozní odolnost. Ferit až dvojnásobně zvyšuje mez kluzu, zlepšuje odolnost proti korozi pod mechanickým napětím, má vyšší tepelnou vodivost a deformačně nezpevňuje materiál, zatímco austenit zlepšuje houževnatost a plasticitu [4]. Vhodné jsou ke slévání, oproti jiným druhům lze zhotovit složité tenkostěnné odlitky. Použití nacházejí v prostředích anorganických kyselin a chloridů. [4] [5]

Martenziticko-feritické (poloferitické) oceli obsahují do 0,25 % uhlíku a jsou legovány přibližně 17 % chromu. Při ohřevu se částečně vytvoří austenit, ze kterého se při pomalém ochlazení vylučují karbidy a nitridy. Rychlým ochlazením však dojde k martenzitické transformaci a vzniku feriticko-martenzitické struktury. Zástupcem této skupiny je typ AISI 430, který lze použít jako náhradu často používané austenitické AISI 304. „Tyto ocele tvoří

přechodnou skupinu mezi korozivzdornými martenzitickými a žáruvzdornými feritickými oceli.“[4] [15]



Obrázek 6: Struktura austeniticko-feritické oceli (64 % austenitu, 36 % feritu) [16]

2.1.1.5 Precipitačně vytvrditelné

Precipitačně vytvrzené oceli mohou být martenzitického a austenitického typu. Vznik precipitátů je dosažen dvěma kroky. U obou druhů je rozpouštěcím žháním v oblasti austenitu dosažena homogenní struktura nasycená legujícími prvky. U martenzitických typů se dostatečně rychlým ochlazením vytvoří martenzit, naproti tomu u austenitických precipitačně vytvrditelných ocelí je austenit stabilní i za nízkých teplot. Následné precipitační vytvrzování buď z martenzitu nebo austenitu dává impuls pro vznik precipitátů. Vhodně umístěné intermetalické precipitáty na bázi molybdenu, titanu, mědi, niobu, hliníku či vanadu (např. Ni_3Ti) tvoří překážku pro pohyb dislokací i za vysokých teplot (až 750 °C) a výrazně zvyšují mez kluzu. Výhodou tohoto zpracování je možnost obrábění ve stavu před precipitačním vytvrzením, a jelikož vytvrzování probíhá za poměrně nízké teploty, nedochází následně k deformacím materiálu tak jako u kalení [4] [5]. Jako příklad jsou uvedeny vlastnosti martenzitické oceli AISI 630 (Tabulka 1), která může být obráběna jak ve stavu po rozpouštěcím žháním, tak ve stavu vytvrzeném, přičemž s rostoucí teplotou precipitačního vytvrzení je pozorována lepší obrobitelnost [17]. Vysoká pevnost těchto materiálů se využívá v tryskových motorech, turbínových kolech, ventilátorech apod. Použití nákladných prvků a procesy spojené s precipitačním vytvrzováním činí tyto oceli cenově nejnáročnějšími z korozivzdorných ocelí. [5]

Tabulka 1: Vybrané mechanické vlastnosti oceli AISI 630 při pokojové teplotě [17]

Podmínky	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	Tvrдость HRC
A	-	-	36
H 900 (482)	1262	1365	44
H 1025 (552)	1117	1158	38
H 1075 (579)	1020	1131	36
H 1150 (621)	869	993	33
H 1150M (621)	600	848	29

Pozn.: A – stav po rozpouštěcím žlhaní. H – stav po precipitačním vytvrzování; následující číselná hodnota udává teplotu precipitačního vytvrzení ve °F, v závorce ve °C; M – dvojitě precipitační vytvrzení.

2.1.2 Dle chemického složení

2.1.2.1 Chromové

Jsou martenzitického nebo feritického typu. Zatímco feritické obsahují až 30 % chromu a nízký obsah uhlíku, martenzitické mají 12–18 % chromu a až 1 % uhlíku. Martenzitické oceli jsou samokalitelné, ale běžně se kalí do oleje s následným popouštěním pro zlepšení houževnatosti. U martenzitických ocelí musí být pro dosažení pasivačního účinku uhlík vyvážen vyšším obsahem chromu. Jelikož feritické oceli nejsou kalitelné, je možné jejich mechanické vlastnosti měnit jen tvářením za studena a rekrystalizací. [4]

2.1.2.2 Chromniklové

Nikl je hlavní prvek pro tvorbu oblasti austenitu. Navíc díky niklu vzroste korozivzdornost, houževnatost a plasticita. Nejsou magnetické, a proto je lze snadno rozlišit od jiných chromových ocelí. Stejně jako feritické oceli je nelze zakalit, ale jsou schopné se zpevňovat tvářením za studena. Často používaným zástupcem je typ AISI 304 (ČSN 17 240). [5] [13]

2.1.2.3 Chrommanganové

Vzhledem k vysoké ceně niklu je často tento austenitotvorný prvek částečně nahrazován levnějším manganem a dusíkem. [4]

2.2 Značení korozivzdorných ocelí

Aby bylo možné se orientovat v široké škále existujících korozivzdorných ocelí, jsou popsány mezinárodně používané systémy značení materiálů.

2.2.1 Podle ISO

Standard ISO 15510:2010 rozeznává více než 140 druhů korozivzdorných ocelí, které jsou založeny na základě oborových, národních a evropských norem (např. AISI, JIS, EN). Název oceli je složen dle vzoru:

XXXX	-YYY	-ZZ	-T
------	------	-----	----

Kde XXXX je kód evropského značení, YYY udává číslo normy AISI, ZZ kódování ISO a T doplňující informace. Tedy např. označení 4303-305-00-I předepisuje ocel 1.4303 dle (EN), AISI 305, 00 ISO, I – na základě originálního ISO složení. [18]

Tabulka 2: Význam doplňkové číslice T [18]

C	Na základě čínského složení
E	Na základě evropského složení
I	Na základě originálního ISO složení
J	Na základě japonského složení
U	Na základě složení USA
X	Na základě 2 a více standardů

2.2.2 Podle EN 10027-1 a EN 10027-2

Norma EN 10027-1 definuje stavbu značek ocelí. Legované oceli kromě rychlořezných se značí následovně:

X	nnn	a...n-n
---	-----	---------

Kde „X“ značí obsah jednoho legujícího prvku $\geq 5\%$, „nnn“ stonásobek procentuální střední hodnoty uhlíku, „a...“ chemickou značku legujících prvků a „n-n“ sestupně střední hodnoty obsahu legujícího prvku zaokrouhlený na nejbližší vyšší číslo [19]. Například označení X5CrNi17 - 7 nám dává informaci o oceli s obsahem 0,05 % uhlíku, 17 % chromu a 7 % niklu. [20]

Systém číselného označování podléhá normě EN 10027-2. Stavba čísel je následující:

1.	XX	YY(YY)
----	----	--------

Kde 1 je hlavní číslo skupiny materiálu (ocel), „XX“ značí číslo skupiny ocelí a YY(YY) pořadové číslo. Korozivzdorné skupiny ocelí mohou nabývat následujících hodnot „XX“ (viz Tabulka 3). [21]

Tabulka 3: Čísla skupin korozivzdorných, žáruvzdorných a žárupevných ocelí podle EN 10027-2 [21]

40	nerezavějící oceli s méně než 2,5 % Ni bez Mo, Nb, Ti	44	nerezavějící oceli s $\geq 2,5\%$ Ni s Mo, bez Nb a Ti	47	žáruvzdorné oceli s $<2,5\%$ Ni
41	nerezavějící oceli s méně než 2,5 % Ni s Mo, bez Nb a Ti	45	nerezavějící oceli se zvláštními přísadami	48	žáruvzdorné oceli s $\geq 2,5\%$ Ni
43	nerezavějící oceli s $\geq 2,5\%$ Ni bez Mo, Nb, Ti	46	46 chemicky odolné a žárupevné slitiny Ni	49	Vysocepevné, žárupevné materiály

Podle AISI

I přes to, že se jedná o oborovou normu z USA, je značení korozivzdorných ocelí podle této normy velmi rozšířeno v ČR i ve světě. Značení se sestává ze tří číslic, které mohou být doplněny písmennou značkou takto:

AISI	XXX	Y
------	-----	---

AISI 2XX – Austenitické chrom-nikl-manganové oceli.

AISI 3XX – Austenitické chrom-niklové oceli.

AISI 4XX – Feritické a martenzitické chromové oceli.

AISI 5XX – Martenzitické středně chromové oceli.

AISI 6XX – Chromové precipitačně vytvrzené oceli.

Kde „Y“ může být:

L – Se sníženým obsahem uhlíku.

Ti – S obsahem titanu.

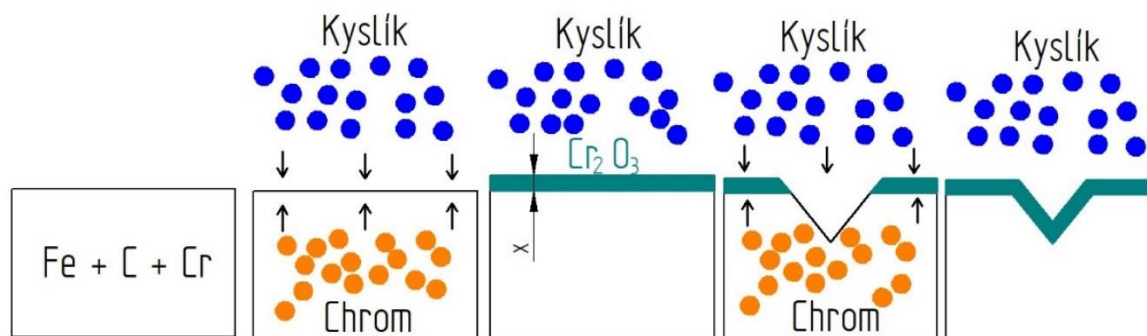
F–S obsahem síry.

N–S obsahem dusíku.[22] [21]

2.3 Ochrana proti korozi

Korozní odolnost korozivzdorných ocelí je jejich charakteristická vlastnost založená na složitém jevu pasivace.

Průběh neustálé koroze na běžné uhlíkové oceli je dán možností přístupu kyslíku ke stále hlubším vrstvám napadeného materiálu. Oxidačně-redukčním dějem dochází ke vzniku oxidů železa o různých objemech, které se vzájemně trhají a odlupují. Některé kovy, jako například hliník, titan, zinek a chrom, oxidují mnohem rychleji než slitiny železa, ale přesto jsou oproti němu v různých prostředích mnohem stálejší. U těchto prvků dochází za přístupu kyslíku k procesu samovolné pasivace. Tím vzniká průhledná vrstva oxidu o tloušťce $x=100 - 500 \mu\text{m}$, která zabraňuje dalšímu přístupu vzduchu k základnímu materiálu – pasivační vrstva. Značnou výhodou při narušení této vrstvy je schopnost repasivace, tedy obnovy narušeného pasivního filmu (Obrázek 7). Jak již bylo zmíněno, pro rovnoměrnou ochranu ocelí proti elektrochemické korozi je potřeba minimální obsah 12 % chromu při kontaktu s neutrálním vodným roztokem. Tato hodnota je však závislá na okolním prostředí a na množství uhlíku v oceli (viz martenzitické struktury). Legování niklem dále zlepšuje schopnost ochrany před korozi v kyselinách a zpomaluje rychlost koroze. [5] [4] [13]



Obrázek 7: Schéma průběhu pasivace (vytvořeno podle [23] a [24])

Při obráběcích operacích dochází k narušení pasivační vrstvy a nově vzniklý povrch je v aktivním stavu (není chráněn pasivační vrstvou). Současný kontakt s částicemi železa, nečistotami a řeznými kapalinami může způsobit vznik koroze. Té lze zabránit aplikací mořících přípravků vhodných k odstranění železné kontaminace na obrobený povrch, případně pasivačními přípravky na bázi kyselin dusičné nebo citronové. Pasivační přípravky dále posilují tloušťku pasivační vrstvy a tím pádem odolnost v agresivních prostředích. [25] [26]

Pro porovnání odolnosti ocelí proti korozi je možno použít teoretický výpočet PREN (index odolnosti proti bodové korozi) dle rovnic (1) a (2), do kterých se dosazují procentuální zastoupení prvků. Tyto výpočty však nejde použít pro určení vhodnosti dané třídy oceli v konkrétním prostředí. [27]

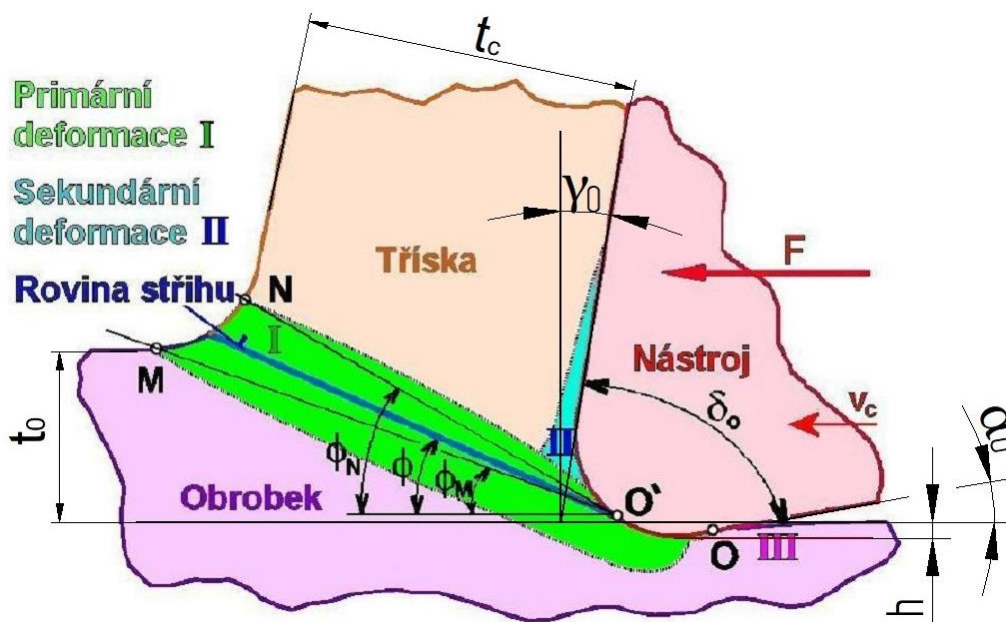
$$PREN = \% Cr + 3,3 * \% Mo + 30 * \% N \quad (1) [28]$$

$$PREN = \% Cr + \% Ni \quad (\text{pro oceli bez obsahu Mo a N}) \quad (2) [28]$$

2.4 Tvorba třísky

Vzhledem k tématu práce jsou popsány základní znalosti o tvorbě tvářené třísky a následně jevy důležité při obrábění korozivzdorných ocelí. Problematika je řešena pro případ volného ortogonálního řezání, tedy tak, že ostří je po celé délce kolmé vůči směru hlavního řezného pohybu. S těmito předpoklady je možné popisovat danou situaci v jedné rovině.

Při řezném procesu dochází k tváření třísky ve třech oblastech, a to v primární, sekundární a terciální (viz Obrázek 8). V těchto oblastech probíhají nejprve elastické, a poté plastické deformace.



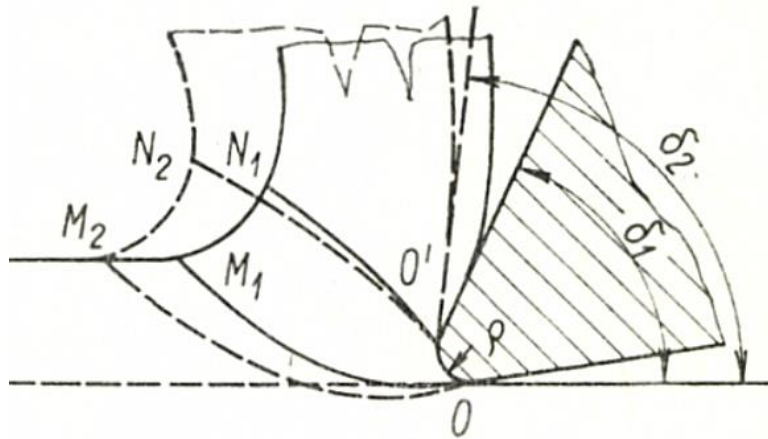
Obrázek 8: Deformační oblasti (podle [29], upraveno)

2.4.1 Oblast primární plastické deformace

Leží v odřezávané vrstvě a je ohraničena křivkami mezi body OMNO', kde body M a N leží mezi a úhlem počátku plastických deformací Φ_m a koncem deformací Φ_n . Zjednodušeně se dá říct, že při zvětšujících se řezných rychlostech křivky OM a O'N splynou až do vytvoření jedné

úsečky určující rovinu stříhu pod úhlem Φ . V této rovině vlivem působení nástroje silou vzniká v materiálu napětí, které při překročení meze pevnosti ve smyku způsobí odstřížení třísky. Ta je plastickým chováním kovu v rovině stříhu zpevněna. Působením sil se do roviny stříhu přivádí většina vynaložené energie, zejména do místa styku mezi břitem a odebíraným materiálem. [30] [31]

Z hlediska geometrie má na tvar, velikost a polohu této oblasti vliv úhel řezu δ . Se zvětšujícím se δ dochází k intenzivnější a hlubší deformaci a zpevnění materiálu pod obrobeným povrchem (Obrázek 9).



Obrázek 9: Vliv úhlu řezu na oblast primární plastické deformace [30]

2.4.2 Oblast sekundární plastické deformace

Nachází se v místě dotyku třísky s plochou čela. Vlivem působení vysoké teploty a tlaku může dojít ke kontaktu čistých kovových ploch a místnímu navařování. Pro překonání těchto svarů je nutné překonat jejich pevnost, což znamená nárůst napětí na čele a v přilehlých oblastech třísky. Vlivem těchto napětí je tříska plasticky tvářena. [30]

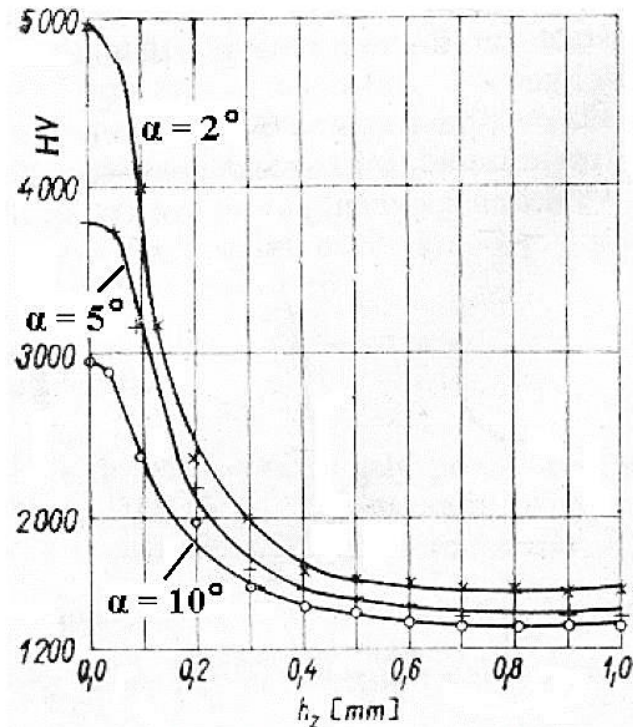
2.4.3 Oblast terciální plastické deformace

Terciální plastická deformace vzniká v povrchové vrstvě obrobené plochy mezi hřbetem nástroje a obrobeným povrchem. Z důvodu zaoblění řezné hrany nedochází k dokonalému odříznutí třísky, ale její vrstva o hloubce „h“ je deformována pod břit nástroje (Obrázek 8), což má za následek zpevnění této vrstvy. [30] [34]

2.4.4 Deformační zpevnění obráběného materiálu

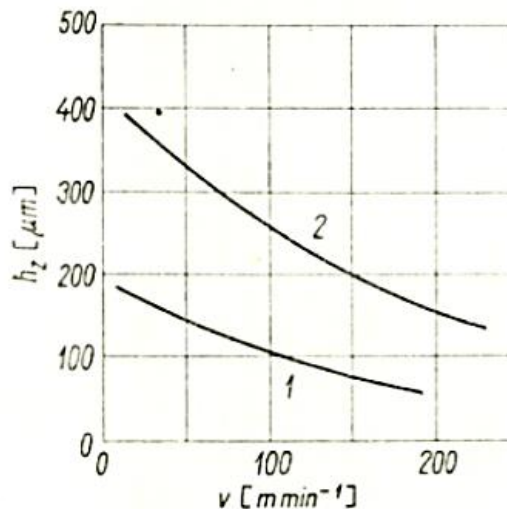
Jak vyplývá z předchozích kapitol, deformační zpevnění materiálu obrobené vrstvy vzniká v oblasti primární a terciální plastické deformace. Poklesu vlivu deformačního zpevnění lze dosáhnout zvětšením úhlu hřbetu (Obrázek 10), čímž klesne styčná plocha s obrobenou vrstvou a tím i síla na hřbetě.

Jev deformačního zpevnění je obvykle nežádoucí, jelikož zvyšuje řezné síly, zmenšuje úhel roviny stříhu a způsobuje větší otěr čela nástroje. Právě úhel čela ovlivňuje velikost deformační síly, kdy je doporučeno používat pozitivní geometrii. Například pro nástroje z rychlořezné oceli v rozsahu 5 až 10°, v případě austenitických ocelí blíže k vyšším hodnotám z důvodu jejich houževnatosti a vysokému sklonu ke zpevnění. [49]



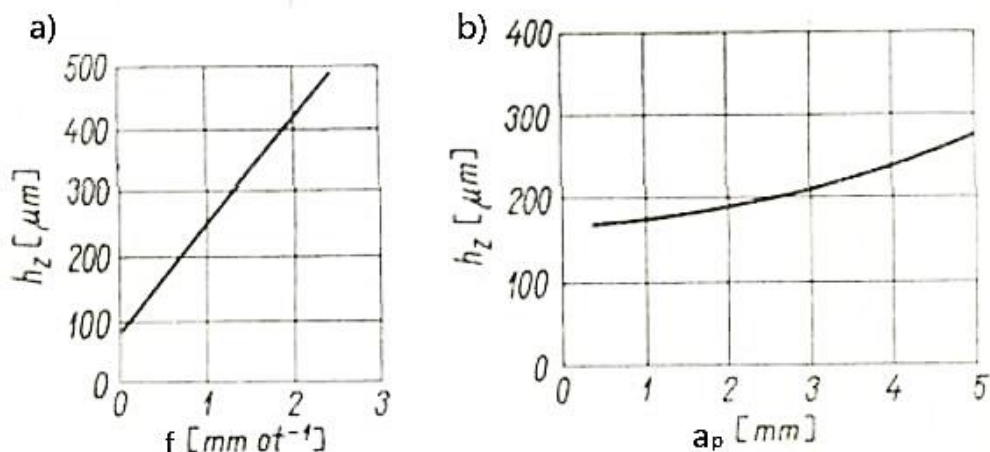
Obrázek 10: Vliv úhlu hřbetu na tvrdost a hloubku zpevněné vrstvy [32]

Nástroj pro obrábění korozivzdorných ocelí by měl mít co nejmenší poloměr zaoblení řezné hrany tak, aby docházelo k lepšímu řezání, menším deformacím a tvorbě tepla. Při zvýšeném otupení (zvětšení poloměru řezné hrany) dochází k většímu zpevnění (Obrázek 11) a tvorbě nárůstků. Úplnému otupení nástroje je potřeba předcházet včasnou výměnou nástroje. Zpevnění však může nastat i při ostrém nástroji, pokud neřeže s dostatečným přísuvem, při přerušení řezu anebo nízkém posuvu. [5]



Obrázek 11: Vliv otupení nástroje na hloubku zpevnění obráběného povrchu 1 – ostrý nástroj; 2 – otupený nástroj [30]

Z hlediska řezných podmínek je tloušťka a intenzita zpevnění vrstvy závislá na řezné rychlosti, tloušťce odřezávané vrstvy (resp. posuvu) a šířce třísky (resp. přísuvu) viz Obrázek 12. [30]

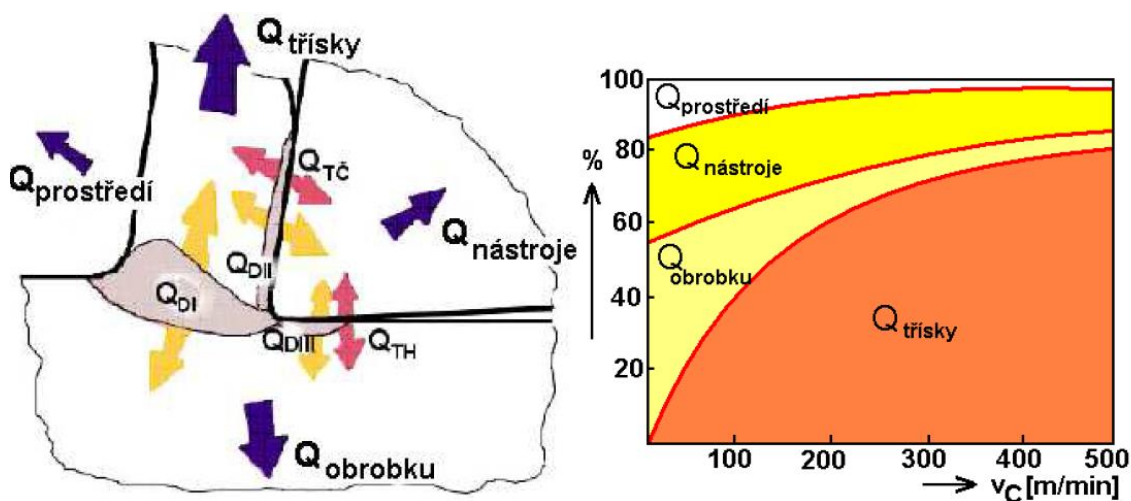


Obrázek 12: a) Vliv posuvu na hloubku zpevnění b) Vliv přísuvu na hloubku zpevnění (podle [30])

Ovlivnit deformační zpevnění lze i zvýšením řezné rychlosti, při kterém dochází ke zmenšení oblasti primární plastické deformace a zvětšuje se úhel roviny stříhu. Oblast primární plastické deformace potom sice méně zasahuje do povrchové vrstvy, ale na druhou stranu byla experimentálně pozorována zvyšující se tvrdost povrchu při zvýšení řezné rychlosti, což lze vysvětlit rostoucí teplotou v řezu, a tedy snazší plastickou deformací. Z toho lze usoudit, že řezná rychlost má na deformační zpevnění nekonstantní vliv. Hloubka a míra deformačního zpevnění lze zlepšit i snížením poloměru špičky nástroje a zvětšením úhlu nastavení hlavního ostří. [33] [16]

2.4.5 Tvorba a odvod tepla vzniklého při obrábění

Během procesu obrábění se většina energie vnesené strojem přemění na teplo. Hlavním zdrojem tepla je tvorba třísky v oblasti primární plastické deformace, následovaná třením třísky o čelo nástroje v oblasti sekundární, a třením hřbetu o obrobený povrch (oblast terciální plastické deformace) [80]. Obecně se dá říci, že se zvyšující se řeznou rychlostí roste podíl tepla převedeného do třísky, viz Obrázek 13.



Obrázek 13 Rozdělení odvedeného tepla [34]

Přestože je tato problematika širší, je zde přeměna vložené energie na teplo vyšetřena v souvislosti s úhlem střížné roviny. Tvorba tepla může být přeneseně vyjádřena pomocí poměrného součinitele třísky vztahem (3):

$$r = \frac{t_0}{t_c} = \frac{\sin\Phi}{\cos(\Phi - \gamma)}$$

(3) [35]

Kde: t_0 je tloušťka třísky před řezem [mm]

t_c tloušťka třísky po řezu [mm]

Φ úhel roviny stříhu [°]

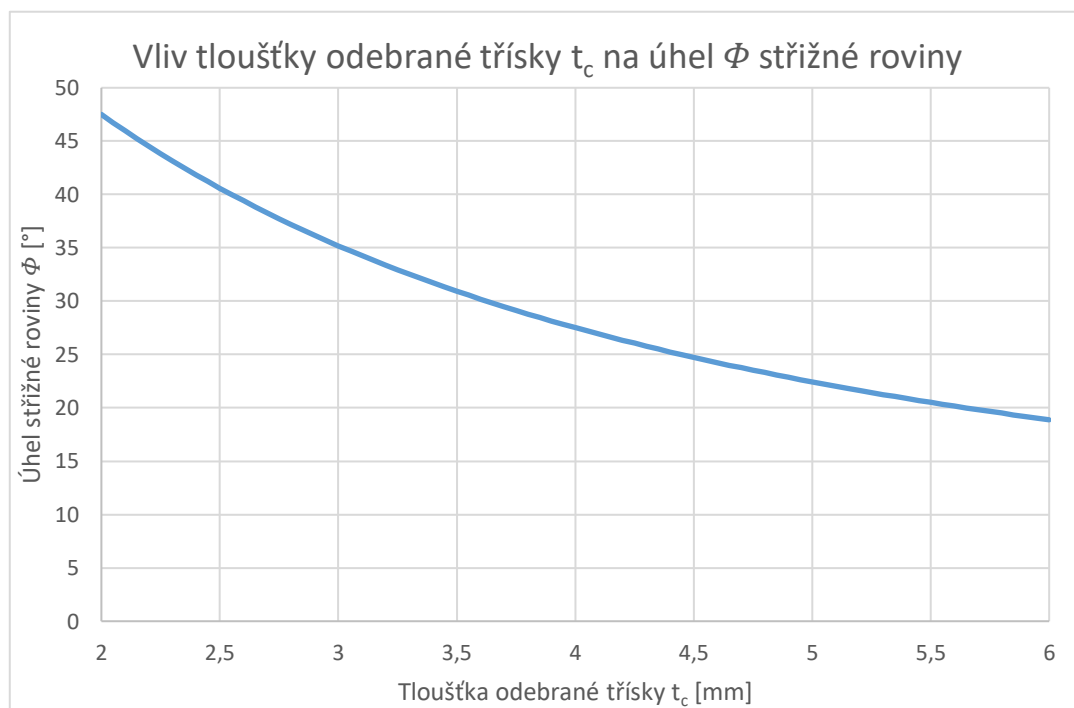
γ úhel čela nástroje (viz Obrázek 8) [°]

Po matematické úpravě lze získat vztah (4) pro úhel sklonu roviny stříhu.

$$\Phi = \arctg\left(\frac{\frac{t_0}{t_c} \times \cos(\gamma)}{1 - \frac{t_0}{t_c} \times \sin(\gamma)}\right)$$

(4) [35]

Ze kterého vychází následující závislost (Obrázek 14). Jako hodnota tloušťky třísky před řezem t_0 byla zvolena hodnota 2 mm a úhel čela γ byl položen 5°.









Obrázek 14: Vliv tloušťky odebrané třísky t_c na úhel Φ střížné roviny

Se zvětšující se tloušťkou odebrané třísky t_c tedy klesá úhel střížné roviny, čemuž odpovídá delší rovina stříhu. Jelikož se vzrůstající délkou této roviny roste potřebná energie k deformaci a síla nutná pro překročení meze smyku, je nutné zajistit vyšší výkon stroje. Tím je vneseno do řezu více tepla, klesají mechanické vlastnosti nástroje a míra jeho opotřebení v čase roste rychleji. Tyto jevy mají dále vliv i na vznikající třísku a drsnost obrobeného povrchu. Úhel střížné roviny je možné zvýšit například použitím větší hodnoty úhlu čela (Obrázek 9) nebo snížením koeficientu tření mezi třískou a čelem (např. vhodným povlakem, zlepšením mazání). [35] [36]

2.5 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí

Obrobitelnost je komplexní vlastnost, která charakterizuje míru schopnosti materiálu být obráběn. Je to zásadní technologická vlastnost při volbě rezných podmínek. Ačkoliv se o obrobitelnosti hovoří jako o vlastnosti materiálu, je závislá na dalších činitelích a musí na ni být pohlíženo s jistým odstupem. Z hlediska materiálu závisí na jeho chemickém složení, tepelném zpracování, způsobu výroby a fyzikálních vlastnostech. Při vyhodnocení obrobitelnosti je ale potřeba uvážit podmínky, při kterých je obrobitelnost testována, tzn. materiál a geometrii nástroje, rezné prostředí, rezné podmínky, způsob upnutí apod. Obráběné materiály jsou dle standardu ISO rozděleny do šesti kategorií (Obrázek 15), které jsou dále specifikovány pomocí MC kódů podle specifických vlastností (tvrdost, tepelné zpracování, způsob výroby, skupiny a podskupiny daných materiálů). Korozivzdorné oceli jsou značeny žlutou barvou s písmenem M, kdy feritické a martenzitické korozivzdorné oceli mají podobné vlastnosti při obrábění jako nízkolegované oceli, a proto spadají do skupiny P. [9] [29] [37]

 <p>ISO P</p>	<p>Ocel Referenční materiál: Nízkolegovaná ocel, CMC02.1/ HB 180</p>	 <p>ISO N</p>	<p>Slitiny hliníku Referenční materiál: Litý, nestárnutý, CMC 30.21/HB 75</p>
 <p>ISO M</p>	<p>Korozivzdorná ocel Referenční materiál: Austenitická korozivzdorná ocel, CMC 05.21/ HB 180</p>	 <p>ISO S</p>	<p>Žárovzdorné slitiny Referenční materiál: Na bázi Ni, CMC 20.22/HB 350</p>
 <p>ISO K</p>	<p>Litina Referenční materiál: Šedá litina, CMC 08.2/HB 220 Nodulární litina, CMC 09.2/HB 250</p>	 <p>ISO H</p>	<p>Kalená ocel Referenční materiál: Kalený a popouštěný, CMC 04.1/HRC 60</p>

Obrázek 15: Základní rozdělení obráběných materiálů dle ISO [38]

Obrobitelnost daného materiálu se ale často uvádí ve srovnání s jiným etalonovým materiálem. Podle celostátního normativu je pro veškeré oceli určen etalonový materiál ČSN 12 051.1 s obrobitelností 14b a ostatní oceli jsou od něho odstupňovány do maximálně 20 tříd, nejčastěji v rozmezí od 4b do 18b. Tyto třídy jsou odstupňovány podle indexu obrobitelnosti, který se stanovuje zkouškami, a porovnává reznou rychlost zkoušeného a etalonového materiálu pro danou trvanlivost bříty. Podle určené třídy obrobitelnosti materiálu lze následně volit rezné podmínky. [39]

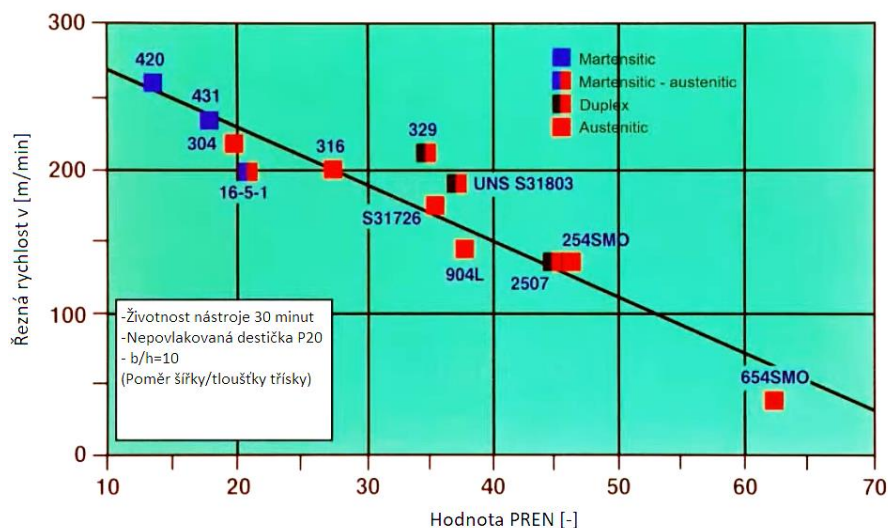
Tabulka 4: Struktura a třída obrobitelnosti pro soustružení u vybraných ocelí [39] [40] [41]

Materiál ČSN	Stav	Ekvivalent	Struktura	Třída obrobitelnosti
17 023	Žiháno	AISI 416	Martenzitická	11b
17 042	Žiháno	AISI 440B	Martenzitická	9b
17 042	Kaleno na 58 HRC	AISI 440B	Martenzitická	4b
17 251	Žiháno	AISI 309	Austenitická	9b
17 460	Žiháno	AISI 202	Austenitická	6b

Pozn.: B – S obsahem boru

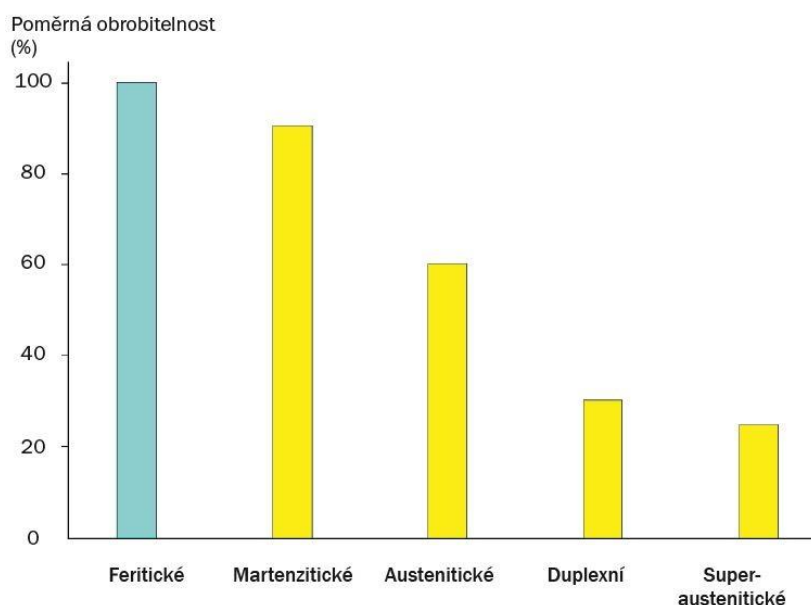
Společným znakem korozivzdorných ocelí je vysoký obsah legur přidaných za účelem zvýšení ochrany proti korozi. Legující prvky také obvykle zvyšují pevnost, někdy též

houževnatost, a tím zhoršují obrobiteľnosť. Bylo pozorováno, že se zvyšující se korozivzdorností (resp. hodnotou PREN, viz kapitola 2.3) klesá důležitý ukazatel obrobiteľnosti – řezná rychlost umožňující určitou životnost nástroje (Obrázek 16). [28]



Obrázek 16: Závislost řezné rychlosti na hodnotě PREN pro danou trvanlivost nástroje [28]

Oproti uhlíkovým ocelím mají obvykle veliký rozsah mezi pevností v tahu a mezí kluzu. Nepříznivá je také nízká tepelná vodivost vlivem vysokého obsahu chromu a vysoký součinitel tření mezi třískou a čelem nástroje. „Vznikající teplo nemůže snadno přejít do obrobku a hromadí se v blízkosti nástroje.“ [5] Tedy se dá předpokládat, že tok tepla tak, jak popisuje Obrázek 13, bude více směřován do nástroje. To zvyšuje nároky na odvod vzniklého tepla chlazením a současně na mazání nástroje. Vysoká tažnost materiálu dává za vznik nevhodným dlouhým třískám, které se snadno namotají na nástroj, čímž mohou snížit jeho životnost a poškodit obrobený povrch. Sklony k deformačnímu zpevnění materiálu dále zvyšují nároky na tuhost soustavy SNOF a výkon stroje. Na obrobiteľnosť má vliv také způsob zpracování polotovaru, kde platí obecná zásada, že je potřeba volit dostatečnou hloubku řezu tak, aby se první třískou dostalo pod licí kůru. Orientační porovnání obrobiteľnosti základních struktur popisuje Obrázek 17 (etalonem je feritická struktura). [42] [43] [30]



Obrázek 17: Porovnání obrobiteľnosti korozivzdorných ocelí [9]

2.5.1 Obrobitelnost martenzitických ocelí

Je podobná jako u nízkolegovaných ocelí. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku roste tvrdost a pevnost materiálu po zakalení, což při obrábění generuje vysoké teploty a rychlé opotřebení nástroje. Do 0,2 % C stačí mírně zmenšit řeznou rychlost, ale při vyšším obsahu roste zastoupení tvrdých chromových karbidů (viz 2.1.1.2), které působí abrazivně na nástroj a rychlosti musí být značně sníženy. Při tvrdosti nad 30 HRC je již obrábění obtížné [44]. Sandvik případně uvádí, že při obrábění v tvrzeném stavu (nad 55 HRC) rostou nároky na odolnost nástroje proti plastické deformaci a je třeba uvažovat nad užitím nástrojů s obsahem CBN [10]. Vyšší tvrdost po vyžihání způsobuje také přítomnost niklu. Jelikož k zakalení obvykle stačí pouze chladnutí na vzduchu, je možné pro snížení tvrdosti materiál žíhat těsně pod teplotou austenitizace, čímž se začne vylučovat feritická fáze, která má kladný vliv na životnost nástroje a obrobený povrch. Při žihání nad touto teplotou s následným pomalým ochlazováním vzniká ještě měkčí feritická struktura [5] [43]. Tvaru třísek při hrubování se věnovali Holub s Černým. Jejich experiment provedený na oceli X8CrCoNiMo10-6 ukazuje, že při použití vhodných nástrojů, hloubce řezu $a_p=3$ mm, posuvu $f_{ot}=0,42$ mm/ot a řezné rychlosti $v_c=38,5 - 53$ m/min lze dosáhnout přijatelné trvanlivosti nástroje a objemového součinitele třísek. [45] [46]

2.5.2 Obrobitelnost feritických ocelí

Z uvedených struktur mají nejlepší obrobitelnost díky nejnižší pevnosti. Pokud však obsahují více než 20 % chromu, roste přilnavost třísek a jsou doporučeny nižší rychlosti, také se tvoří vinuté smotané třísky, které se špatně dělí. To zvyšuje náklady zejména při upichování, jelikož je potřeba častějšího zásahu obsluhy. Z důvodu nízkého obsahu uhlíku nejsou tepelně vytvrditelné, a tedy vyšší tvrdosti je možno dosáhnout pouze deformačním zpevněním. Zpevnění získané tvářením za studena (např. válcování, tažení) zvyšuje pevnost a mez kluzu, přičemž mez kluzu roste rychleji. Tím dojde ke snížení tažnosti, což má příznivý vliv na aspekty obrobitelnosti jako jsou jakost povrchu, tvorba otřepů, utváření třísky či tvorba nárůstku [5] [47]. Tyto oceli obvykle neobsahují nikl, avšak jeho případné malé množství nemá na obrobitelnost vliv [30]. Tepelná vodivost leží mezi austenitickými a martenzitickými strukturami. Se zvyšující se teplotou (např. v oblasti řezu) feritické oceli tepelná vodivost roste, a je stejná, jako v případě austenitických ocelí (zhruba přes $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ při $600 \text{ }^\circ\text{C}$). Tepelná roztažnost je mírně nižší než u uhlíkových ocelí a činí přibližně 60 % oproti austenitickým ocelím. [48] [46]

2.5.3 Obrobitelnost austenitických ocelí

Ze základních struktur korozivzdorných ocelí jsou nejhůře obrobitelné. Důvodem je oproti feritickým strukturám mnohem vyšší míra deformačního zpevnění za studena, které je způsobeno již nepatrnou deformací. Důležitou roli má i nízká tepelná vodivost.

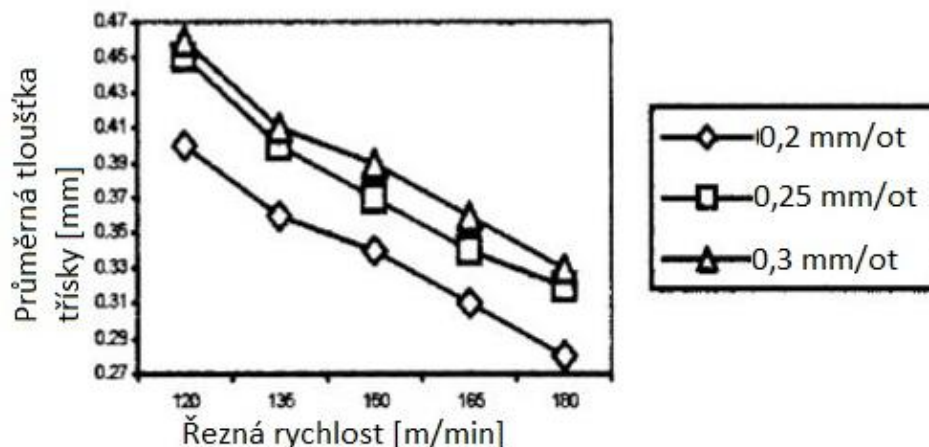
Zpevnění souvisí zejména s přeměnou austenitu na martenzit vlivem působení vysokých deformačních rychlostí, případně za vysoké teploty řezání a měrného tlaku. Míra zpevnění roste s obsahem uhlíku a dusíku (např. oceli s vysokým obsahem dusíku jsou hůře obrobitelné). Vzniklá tvrdá vrstva na povrchu může být i dvojnásobně tvrdší než jádro. Tím brání vniknutí nástroje do obrobku, a to je důvod pro použití nízké řezné rychlosti z důvodu prodloužení životnosti nástroje. Zásadní je dostatečná hloubka řezu tak, aby špička nástroje řezala pod vrstvou zpevněnou předchozím úběrem. V opačném případě zpevněná vrstva přesáhne tloušťku odebírané vrstvy, což má za následek silné namáhání bříty. Změnami hloubky řezu při jednotlivých třískách lze rozložit namáhání bříty tak, že se rozloží riziko vzniku vrubu na úrovni

hloubky řezu. Ačkoliv efekt zpevňování způsobuje vysokou tvrdost obrobené plochy, měrná řezná síla není o mnoho větší než u uhlíkových ocelí. [5] [10] [43] [30] [49]

Nejnižší tepelná vodivost austenitu mezi strukturami má zásadní vliv na životnost nástroje. Třísky a obrobek neodvedou příliš tepla vzniklého třením a deformacemi, to se koncentruje v místě řezu a odchází více do nástroje. Tepelná roztažnost austenitické struktury je vyšší než u ostatních korozivzdorných struktur, dokonce vyšší než u oceli, což má negativní vliv na udržení přesnosti obrábění při výrobě přesných rozměrů. [5] [48]

V závislosti na řezných podmínkách a úhlu čela vzniká více či méně plynulá lamelovitá tříška. Vysoká tažnost, přilnavost k nástroji, rozdíl mezi smluvní mezí kluzu a mezí pevnosti způsobují, že se třísky nepadají a tím je jejich odstraňování obtížné. Proto je doporučeno vybavit nástroj lamačem třísek a volit houževnaté řezné materiály povlakované vrstvami s nízkou tendencí k adhezi [50]. Podobně jako u feritických struktur se dá tažnost snížit tvářením za studena (deformačním zpevňením), čímž je dosaženo menšího sklonu k tvorbě nárůstku a lepšího povrchu. Zvýšená tvrdost ale zkracuje životnost nástroje. Tvorbě třísky na oceli AISI 304 se věnovali Tekiner a Yeşilyurt. Bylo zjištěno, že nižší úroveň hluku při obrábění je spojena s lepším odchodem třísky, a obecně změna hladiny zvuku může být jednoduchou metodou pro vyhodnocení řezného procesu. Také bylo pozorováno, že zvyšováním posuvu a snižováním řezné rychlosti roste tloušťka třísky a klesá její poloměr zaoblení [51]. Ačkoliv Mahdavinejad ve svém výzkumu použil myšlenku, že s rostoucí tloušťkou odebrané třísky roste úhel naklonění střížné roviny, toto tvrzení bylo vyvráceno v kapitole 2.4.5, kde je popsán tento jev opačně. [52]

Vysoká tloušťka třísek po řezu je zvlášť nevhodná. Jednak je to dáno nižším úhlem střížné roviny (viz kapitola 2.4.5), jednak vznikají při nízkých řezných rychlostech, tudíž jim nástroj předá méně pohybové energie.



Obrázek 18: Vliv řezné rychlosti na tloušťku třísky (podle [51], upraveno)

Pozn. Materiál AISI 304; hloubka řezu $a_p=2,5$ mm; průměrné hodnoty stanoveny ze 3 hodnot

Vzniklá tříška se tedy smýká po čele nástroje po delší dobu a delší dráze. Jejich povrch má menší plochu než tenké třísky, a to snižuje možnost odchodu tepla. Zvýšení odvodu tepla do třísky je tedy možné docílit volbou vyšších řezných rychlostí a tím utvářením tenčích třísek s větším objemem. Ty jsou výhodnější i z hlediska vzniku vibrací a drsnosti obrobeného povrchu. Naopak jsou nevhodné z hlediska třískového hospodářství [52] [53] [51]. Vysokých rychlostí lze využít i při soustružení na čisto (metodou vysokorychlostního obrábění). Například podle Lina je vhodné užít posuv v rozsahu 0,04–0,08 mm/ot za rychlosti 350 m/min, kdy při těchto rychlostech bylo dosaženo drsnosti přibližně Ra 0,4 μ m. Přílišné snižování

posuvu by vedlo k navracejícím se projevům chvění a výsledný povrch by se značně zhoršil. [54]

Způsob zpracování má u austenitických ocelí také značný vliv. Pokud má např. tažená austenitická tyč index obrobiteľnosti 1, u výkovku to bude 0,8 a u odlitku 0,6. [54] [55]

2.5.4 Korozivzdorné oceli se zlepšenou obrobiteľností

Standardní polotovary jsou koncipované pro optimální korozní odolnost, kvalitu povrchu a výrobní vlastnosti, ale nikoliv pro obrobiteľnost. Obecně se dá říci, že čím je materiál tvrdší, tím je hůře obrobiteľný. Obrobiteľnost je ale více závislá na mikrostruktuře materiálu než na jeho tvrdosti. Využitím specifických metalurgických procesů lze dosáhnout přesné kontroly nad složením, tvarem, velikostí a rozmístěním přídavných nekovových vměstků, které zlepšují obrobiteľnost. Takové oceli se nazývají jako automatové. [56] [43]

Jako přídavné prvky jsou používány např. síra, měď a bismut, zatímco od používání olova, telluru a selenu se ustupuje z důvodu jejich toxicity. Tyto prvky vytvářejí vměstky, které zlepšují tvorbu třísky tak, že působí jako koncentrátoři napětí a tím dochází k snazší tvorbě nového povrchu. Díky tomu je při obrábění potřeba menších sil a výkonů.

Síra a případně méně efektivní selen jsou přidávány v rozsahu cca do 0,4 %. Vzniklé sulfidy a selenidy (např. NiS, MnS) snadno přilnou k čelu nástroje, kde vytvářejí tenkou vrstvu, která zabraňuje difuzi a snižuje součinitel tření mezi třískou a čelem nástroje. Tato výhoda je limitována jejich nízkou teplotou tavení, respektive řeznou rychlostí. Prvky zároveň snižují tažnost oceli, čímž zlepšují lámavost třísky, a následkem toho se zkracuje délka kontaktu nástroje a třísky. Zejména podlouhlé vměstky vzniklé ve směru válcování za tepla snižují tažnost v příčném směru, tedy by se mohlo zdát, že budou pro obrábění výhodné. Pro dislokace jsou totiž nepřekonatelnou překážkou a je nutné je „rozlámat“, čímž se koncentruje napětí, usnadňuje šíření trhliny a vznik nového povrchu. Na základě experimentů jsou pro obrobiteľnost výhodnější globulární sulfidy, které jsou podporovány přítomností selenu a telluru [57] [58] [59] [60]. S rostoucí velikostí sulfidů roste pozitivní dopad na obrobiteľnost a opotřebení nástroje, ale zhoršuje se drsnost obrobeného povrchu. Zejména ale dochází ke snížení korozivzdornosti (hlavně u manganem legovaných ocelí nebo v přítomnosti chloridů) a mechanických vlastností. Příkladem takové oceli může být automatová austenitická ocel AISI 303. Oproti oceli AISI 304 lze nepatrnou změnou zastoupení prvků a přidáním síry zvýšit rychlosti při obrábění o 25–30 %. [43] [61]

Právě z důvodu zhoršení korozivzdornosti jsou vyvíjeny materiály se zlepšenou obrobiteľností, které si co nejvíce zachovávají svou korozivzdornost. Příkladem může být legování austenitických a martenzitických ocelí pomocí mědi. Ta zlepšuje jak obrobiteľnost, tak korozivzdornost a při pokusech bylo pozorováno menší opotřebení nástroje. [62]

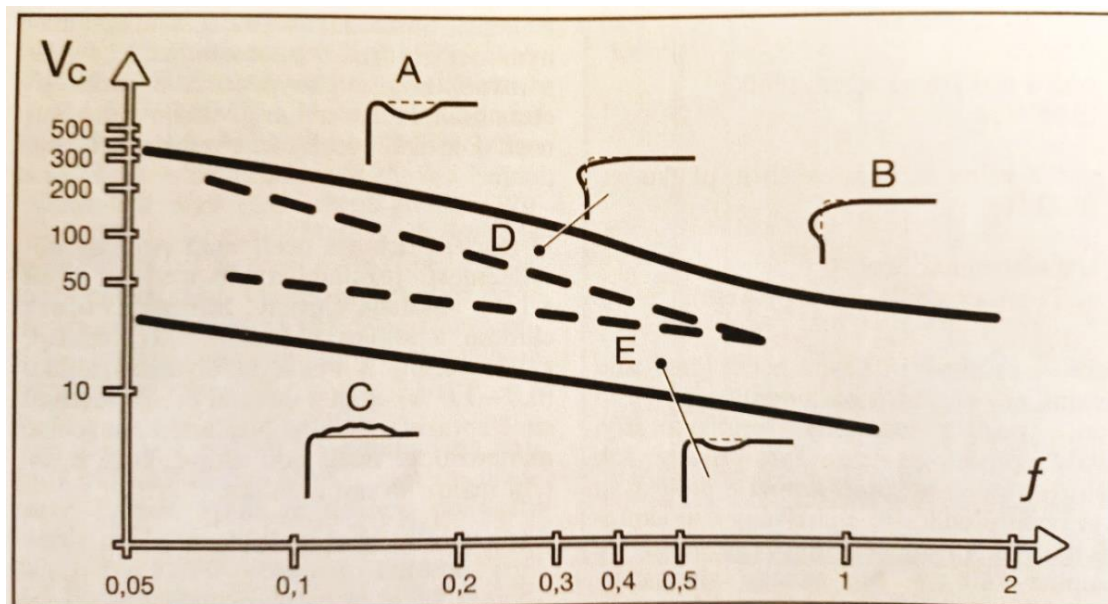
Zlepšit obrobiteľnost lze i snížením obsahu uhlíku, a to řádově na setiny procenta (dle normy AISI oceli zakončené koncovkou „L“). Další snižování obsahu již nemá význam. Nedostatek uhlíku způsobí, že nevznikají již zmiňované karbidy (viz kapitola 2.1.1.2). Naopak na obrobiteľnost ocelí s vysokým obsahem uhlíku nemá kvůli těmto karbidům příliš význam přidání síry a selenu. Pro austenitické a feritické struktury s větším zastoupením uhlíku však existuje možnost takzvané stabilizace pomocí prvků titanu a niobu, které mají k uhlíku větší afinitu, tudíž uhlík nemá snahu vytvářet abrazivní chromové karbidy. Je však nutné být na pozoru v případě přítomnosti dusíku, jehož působením mohou vznikat ještě tvrdší karbonitridy titanu. Naopak v přítomnosti síry vznikají sulfidy titanu, které zlepšují obrobiteľnost a nemají negativní vliv na korozivzdornost tak, jako v případě přidání manganu.

Stabilizace je vhodná i tam, kde hrozí uvolnění vnitřního napětí materiálu působením nástroje. [4] [5] [43]

Při výrobě korozivzdorné oceli je nutné zařadit proces, který neutralizuje nežádoucí účinek kyslíku – deoxidaci. Té je ale docíleno prvky, které jsou i přes jejich nízký obsah často škodlivé pro obrábění. Obvykle je deoxidace dosaženo přidáním křemíku nebo hliníku, kteří vytváří vměstky. Z hlediska obrábění je mnohem vhodnější použití křemíku, jelikož jeho kyslíkaté sloučeniny při vyšších řezných teplotách měknou, a tak vytvoří vrstvu zpomalující opotřebení břitu. Naopak hliníkové oxidy jsou tepelně odolné a značně abrazivní. Připojením vhodného množství vápníku vznikají vměstky s měkkým povrchem, které při vyšších teplotách dále měknou, což zlepšuje tvorbu třísky. Například tvrdé částice korundu jsou obaleny v měkké vrstvě vápna, nebo vznikají jiné sloučeniny s nižší teplotou tavení, a tedy i lepší tvařitelností. I zde vzniká na povrchu nástroje ochranná vrstva (oxidů, hlinitanů, sulfidů), která je ale oproti výše zmíněným tepelně stabilnější. Zabraňuje difuzi a snížením tření mezi nástrojem a třískou dochází k menší tvorbě tepla. Na druhou stranu podle zdroje [63] došlo přidáním vápníku ke zmenšení úhlu střižné roviny Φ , tedy větší tloušťce odebrané třísky a jejím pomalejšímu odchodu. Také byla pozorována vyšší míra deformačního zpevnění. Výsledkem úpravy pomocí vápníku je možnost použití vyšší řezné rychlosti a menší opotřebení nástroje ve formě výmolů na čele a otěru hřbetu. [43] [64]

2.6 Opotřebení nástroje

Výše zmiňované jevy způsobují některá, pro korozivzdorné oceli typická opotřebení řezného nástroje. V následujících případech opotřebení je předpokládáno použití SK jako řezného materiálu. Obrázek 19 zobrazuje všeobecný přehled oblasti uspokojivé obrobitelnosti při daných řezných podmínkách pro austenitické oceli. Oblast je omezena opotřebením ve tvaru výmolů na čele (A), extrémní plastické deformace (B), vzniku nárůstku při nízkých řezných rychlostech (C), plastické deformace i pod čarou (D) a výmolů na čele při vysokých posuvech (E). [49]



Obrázek 19: Oblast uspokojivé obrobitelnosti [49]

2.6.1 Opotřebení ve tvaru nárůstku

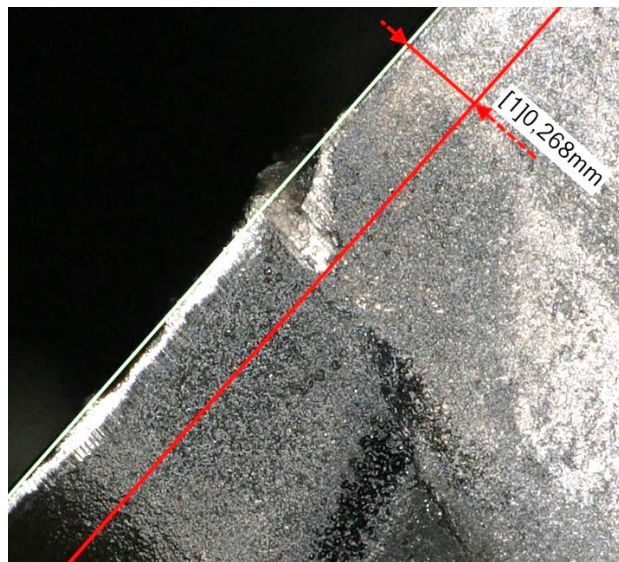
Tvorba nárůstku je projevem vysoké adheze k nástroji a tažnosti obráběného materiálu. Vzniklé třísky ulpívají na čele nástroje, kde dochází k jejich pěchování a mikronavařování. Postupně tak vzniká umělý břit, který je dostatečně tvrdý na to, aby přebral funkci řezné hrany. Podmínkou pro vytváření nárůstku je chemická afinita mezi třískou a nástrojem, vysoký tlak a dostatečná teplota. Jelikož nárůstek postupně roste, způsobí změnu úhlu čela, hloubky přísuvu a tloušťky odřezávané vrstvy. Tím je negativně ovlivněna jednak kvalita obrobeného povrchu, jednak rozměrová přesnost obrobku. Po překročení určité tloušťky dojde k odlomení navařené vrstvy, která může ulpět na obrobené ploše a tím dále zhoršit její kvalitu. Tvorba a odlomení nárůstku se může cyklicky opakovat, ale pokud spolu s odtrženým nárůstkem dojde i k vyštípnutí řezné hrany, vede to k dalšímu zesílení tvorby nárůstku. Intenzivnějším projevem odlomení je vylomení břitu a následně prakticky selhání nástroje.[49] [65] [28]

Obvykle snadným způsobem pro snížení tvorby nárůstku je zvýšení řezné rychlosti. Následně je potřeba se zaměřit na odstranění podmínek pro jeho vznik. Chemická afinita a tření je částečně eliminována použitím tvrdého, otěruvzdorného povlaku. Účinným chlazením v místě řezu lze snížit tamní teplotu, vyšší mazací schopností řezného prostředí se dá zabránit kovové čistotě styčných povrchů. Z hlediska nástroje je doporučena pozitivní geometrie (vysoký úhel čela) a malý poloměr zaoblení řezné hrany.[49] [65]

V jistém smyslu nárůstek chrání čelo nástroje a tedy může prodloužit jeho životnost. Jelikož se tříška tvoří na ulpěné vrstvě, zabraňuje se tím tvorbě výmolů na čele. Experimentálně bylo navíc zjištěno, že větší nárůstky způsobovaly menší tvrdost obrobené povrchové vrstvy [16]. Vzhledem ke změně geometrie a nebezpečí vylomení řezné hrany je však na tento jev pohlíženo negativně.

2.6.2 Opotřebení ve tvaru vrubu

Značné deformační zpevnění způsobuje lokální opotřebení na čele i hřbetu nástroje. Na úrovni šířky odřezávané vrstvy vzniká vrub vlivem deformačně zpevněné abrazivní vrstvy (Obrázek 20). Tvrdá vrstva na povrchu obrobku působí abrazivně na nástroj a jeho povlak, po jehož odstranění je materiál v přímém kontaktu s obnaženým povrchem SK, který má horší kluzné vlastnosti, čímž se v daném místě zvětšuje namáhání oděrem a přilnavost třísek. V důsledku tohoto opotřebení dochází k nebezpečí vylomení břitu, horšímu lámání třísky a špatné kvalitě obrobené plochy.

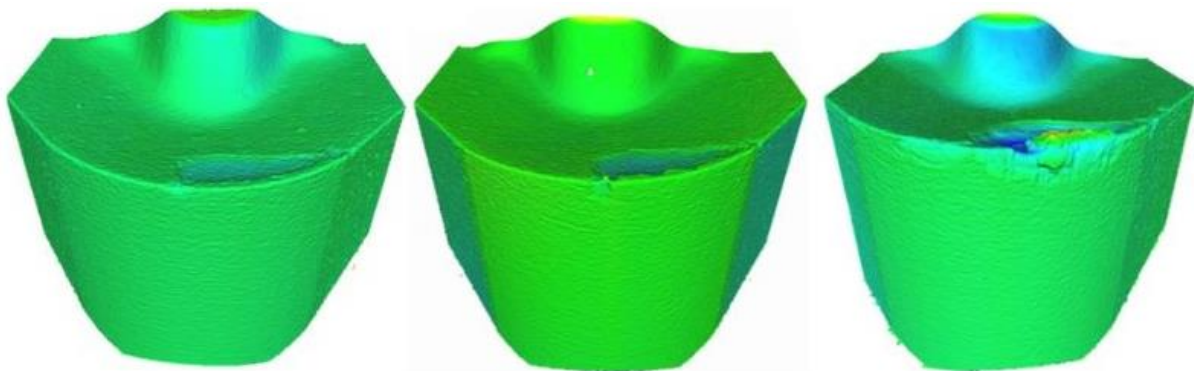


Obrázek 20: Opotřebení ve tvaru vrubu (foto autor), zvětšeno 100x

Potlačit tvorbu vrubu lze zmenšením úhlu K_r . Tím dojde k rozložení tvrdé vrstvy obrobku po delší vzdálenosti nástroje. Rozložení koncentrace abrazivního účinku lze docílit i změnou hloubky řezu v jednotlivých třískách. Pokud je to nutné, připadá v úvahu i tepelné zpracování obrobku tak, aby došlo ke snížení tvrdosti povrchu. Možností je i použití odolnějšího povlaku nástroje. [65] [53]

2.6.3 Opotřebení ve tvaru výmolu na čele

Tvorba výmolu na čele nástroje může být zapříčiněna difuzním, abrazivním i adhezním namáháním. Adhezní poškození se objevuje ve smyslu odlupování navařených nárůstků, které při odlomení oddělí i části nástroje. Abrazivní opotřebení způsobují tvrdé částice a zpevněná vrstva na povrchu vznikající třísky, které obrušují povrch čela. Difuzní vznik výmolu se objevuje například, pokud je použit nástroj s obsahem uhlíku (např. SK s obsahem karbidu wolframu). Afinita uhlíku v nástroji k železu v obrobku a tříске vyvolá přesun zrn z nástroje do třísky, a tedy úbytek materiálu nástroje. Jelikož je tento jev závislý na teplotě, bude vznik výmolu při vysokých řezných rychlostech rychlejší. Hloubka výmolu roste zpočátku pozvolně, ale čím je větší, tím je umožněn horší odvod tepla nástrojem a od jistého momentu roste hloubka intenzivněji [66]. Obrázek 21 ukazuje průběh opotřebení nástroje při soustružení oceli AISI 316, kde vzniklý výmol obnažil povlak a na substrátu vznikl nárůstek, který odlomením dále může prohlubovat tvorbu výmolu [67].



Obrázek 21: Průběh opotřebení nástroje (podle [67], upraveno)

Pozn.: Použitý SK K313 povlakový vrstvou $Ti_{0,33}Al_{0,67}N$ metodou PVD

Přítomností výmolu se zvětší úhel čela, a tedy zmenší úhel břitu. Nová geometrie změní tvar třísky a zeslabuje břit. [49] [65]

Z hlediska nástroje je doporučeno použít nástrojový materiál povlakovaný otěruvzdorným oxidem hlinitým a pozitivní geometrie. Je možno i snížit úhel K_r , což vede k rozložení zatížení na větší plochu čela. Snížení teploty na čele je možno docílit účinnějším chlazením, snížením řezné rychlosti a nakonec posuvu. [49] [65]

2.6.4 Opotřebení ve tvaru plastické deformace břitu

Plastická deformace břitu vzniká jako důsledek nízké tepelné vodivosti. Zejména při dlouhých řezech se hromadí teplo, které způsobuje změknutí nástroje (typicky jeho pojiva) a současně tlakové zatížení deformuje ostří a špičku. To znamená zvětšení řezných sil a intenzivnější generování tepla, změny v geometrii nástroje a odchodu třísek. Navenek se plastická deformace projevuje ovlivněním rozměru obrobku.

Pro omezení plastické deformace je důležité volit nástroje odolné vysokým teplotám (např. se sníženým obsahem pojiva). Účinné chlazení vede k omezení nutné podmínky vzniku

plastické deformace – vysoké teploty. Generované teplo a působící tlak je dále možno omezit snížením řezné rychlosti, posuvu a přísuvu. [49] [65] [68]

2.7 Řezná prostředí

Typ řezného prostředí, způsob aplikace, tlak a průtok mají stejně silný vliv na životnost nástroje a kvalitu povrchu jako materiál nástroje, řezná rychlost a posuv. Proto je důležité při návrhu řezného procesu zvážit dostupné možnosti.

Každé obrábění probíhá v řezném prostředí, přičemž přirozeným prostředím je vzduch. Použití řezných kapalin při obrábění korozivzdorných ocelí je více žádoucí než při obrábění nízkolegovaných ocelí. Z důvodu horší obrobitelnosti a nízké tepelné vodivosti je obvykle nutné použít umělá prostředí. Omezený tok tepla korozivzdornou ocelí vede k tepelnému namáhání nástroje a přehřívání obrobeného povrchu. Zde je nutné se vyhnout teplem vyvolanému, barevně tónovanému povrchu obrobku, který narušuje korozivzdornost. Tepelné působení způsobuje také obtížně odstranitelné deformace součásti. Obrábění za sucha může být vhodné při obrábění rozměrných obrobků nebo při použití metod vysokorychlostního obrábění, a vyžaduje k tomu uzpůsobené nástroje. [43] [69] [33] [70]

2.7.1 Požadované vlastnosti řezných prostředí

Cílem použití řezného prostředí je zejména:

- a) Chladit oblast řezu, tím předejít snížení tvrdosti nástroje, a tedy prodloužit jeho životnost, zlepšit jakost a přesnost obrobeného povrchu.
- b) Mazat oblast styku materiálu s čelem i hřbetem nástroje, tedy snížit tření, vzniklé teplo, opotřebení nástroje, řezné síly a potřebný výkon.
- c) Odplavit třísky.
- d) Chránit pracovní prostor stroje před korozí.
- e) Regulovat tvorbu nárůstků.

Na řezná prostředí jsou dále kladeny nároky ohledně nehořlavosti, nízké pěnovitosti, zdravotní a environmentální nezávadnosti, provozní stálosti, přiměřených nákladů a snadné likvidace. Sloučit všechny tyto požadavky do ideálního prostředí je zatím nemožné, proto je u každého požadavku nutno uvážit jeho důležitost dle aplikace. Důležitým faktorem je i čistota řezného prostředí. Nečistoty ve formě třísek se mohou dostat mezi nástroj a obrobek, a tak poškodit obrobený povrch. [69] [71]

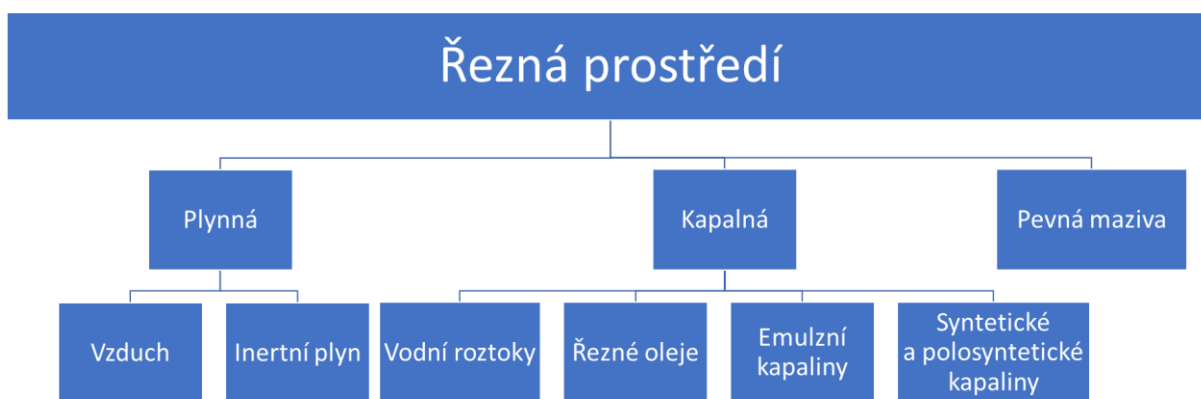
Chladicí účinek řezné kapaliny nastává při oplachování nástroje, obrobku i třísky tehdy, pokud má kapalina nižší teplotu než druhý povrch. Odvedené teplo způsobuje odpaření jistého množství kapaliny, zbytek se obvykle vrací do nádrže, kde se ochlazuje přirozeně vyzařováním tepla do okolí, případně i přídavným chladicím zařízením. Chladicí účinek prostředí bude tím vyšší, čím vyšší budou jeho smáčecí schopnosti, skupenské teplo vypařování, rychlost vypařování, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. Přejít z kapalného do plynného stavu sice odvádí velké množství tepla, ale je nežádoucí z důvodu hospodárnosti, zdravotní, a požární bezpečnosti. Proto se chladicí účinek vyhodnocuje podle měrné tepelné kapacity, tepelné vodivosti a smáčecí schopnosti. [71]

Mazací efekt prostředí je dosažen vrstvou (filmem) prostředí mezi stykovými plochami, zabraňující jejich kovovému dotyku. Tím se zmenší tření mezi nástrojem a obrobkem a mezi nástrojem a třískou. Snížené tření se projevuje plynulejšími plastickými deformacemi, zlepšeným odchodem třísky, menší tvorbou tepla a klidnějším chodem stroje. Navenek je dosažena vyšší jakost povrchu, proto je mazací účinek žádoucí při soustružení na čisto. Předpokladem dosažení mazacího efektu je možnost vniknutí prostředí mezi styčné plochy a dostatečná pevnost mazacího filmu proti tlakům vznikajícím při obrábění. Viskóznější

prostředí mají vyšší pevnost, přičemž vyšší viskozita je dosažena i rostoucím tlakem. Na druhou stranu viskóznější prostředí mají nižší smáčivost a schopnost odvádět teplo, navíc snáze ulpívají na povrchu třísek, což znamená vyšší ztráty. Při zvýšení řezných rychlostí, a tedy teplot viskozita a mazací efekt klesá, naopak roste chladicí účinek. Pokud má prostředí dostatečnou afinitu nebo se chemicky váže s obrobkem či povrchem nástroje, vytváří mezi povrchem třísky a nástrojem mezní třecí vrstvu, respektive mezní tření (povrchy jsou těsně u sebe, ale nedotýkají se). Při mezním tření nedochází k navařování povrchů, čímž je výrazně sníženo tření, adheze a vznik nárůstku. [69] [33] [71]

2.7.2 Rozdělení řezných prostředí

Řezná prostředí mohou být rozdělena podle skupenství na plynná, kapalná a pevná. Základní rozdělení řezných prostředí zobrazuje Obrázek 22.



Obrázek 22: Základní rozdělení řezných prostředí (vytvořeno na základě [72] a [73])

2.7.2.1 Plynná

Plynná prostředí jsou výhodná díky jejich dobrému pronikání mezi plochy. Samotný vzduch je dostupný, ale má malý chladicí účinek. Přívod podchlazeného vzduchu mezi třísku a nástroj při soustružení nepřinesl velký efekt, a proto je obvykle vzduch používán ve stlačené formě pouze pro odstranění třísek. Pro prostředí CO_2 zabraňuje přístupu kyslíku, je ale vhodné jej přivádět na oblast hřbetu nástroje. Při přívodu na třísku totiž dochází k jejímu zpevnění a rychlejší tvorbě výmolu na čele. [73] [74]

Inertní plyny dosahují lepších výsledků. Například atmosféra dusíku zabraňuje oxidaci nástroje a snižuje tření mezi třískou a nástrojem, navíc s rostoucím tlakem přivedeného dusíku byla pozorována delší životnost nástroje. Aplikace tekutého dusíku (při teplotách okolo $-200\text{ }^\circ\text{C}$) vedeného přímo do oblasti řezu intenzivně chladí břit a zachovává jeho tvrdost, proto je možno použít vysokých řezných rychlostí. [74]

2.7.2.2 Kapalná

Je možno na ně pohlížet podle převažujícího účinku (chladicího/mazacího), přičemž chladicí kapaliny jsou založeny na vodní bázi, mazací kapaliny na bázi oleje.

Vodné roztoky jsou dostupné a jednoduché, mají dobrý odvod tepla a čisticí účinek, ale nízký mazací efekt. Jelikož má voda v různých lokalitách odlišnou tvrdost, je někdy potřeba ji upravit (změkčit). Kromě toho se přidávají aditiva a činidla pro ničení bakterií, potlačení koroze, pěnovosti a zlepšení smáčivosti. [69] [72]

Řezné oleje vychází z minerálních olejů. Samotné minerální (ropné) oleje mají dobré mazací schopnosti, nepodléhají bakteriím, odolávají stárnutí, ale hůře odvádějí teplo. Přidáním aditiv (např. na bázi síry, fosforu, či chloru) se zvýší pevnost olejové vrstvy, a tedy mazací efekt. Aditiva při zvýšených teplotách vytvářejí s kovy sloučeniny, které působí jako mazivo, zabraňují navařování třísky a nástroje, a tím snižují tvorbu nárůstku. Při obrábění korozivzdorných ocelí je jako aditivum vhodná kombinace síry a chloru. Takto upravené oleje se používají čisté, nebo mohou být ředěny parafínem v poměru cca 1:1. Vysoké teploty ale představují bezpečnostní riziko, jelikož se rychle odpařují a jsou hořlavé. Proto jsou tyto řezné oleje používají pro soustružení jen zřídka, uplatnění nachází při operacích s vysokými řeznými silami, ale za nízkých teplot. [69] [71] [75]

Emulzní kapaliny jsou nejpoužívanějšími řeznými kapalinami. Jedná se o směs jemně rozptýlených, vzájemně se nerozpouštějících částecí oleje a vody. Obvyklé zastoupení oleje je 5 %, nicméně pro obrábění korozivzdorných ocelí je doporučeno 8-10 %. Tím se spojují chladicí a mazací vlastnosti při cenové dostupnosti. Navíc mohou být přidána aditiva podobná jako u řezných olejů. S rostoucím obsahem oleje ale chladicí účinek klesá. Pro zabránění shlukování oleje je přidán emulgátor. Ten zároveň udržuje zásaditý stav, jinak hrozí bakteriální zamoření emulze. I díky vyšší zásaditosti (běžné hodnoty čerstvých 5% emulzí mají pH větší než 9) jsou emulzí chlazené obrobky málo náchylné ke korozi, dokonce méně, než při chlazení stlačeným vzduchem [76] [77]. Vzhledem k odpařování vody z emulze je nutné ji doplňovat, aby byla udržena správná koncentrace a předešlo se zahřátí sběrné vany. [69]

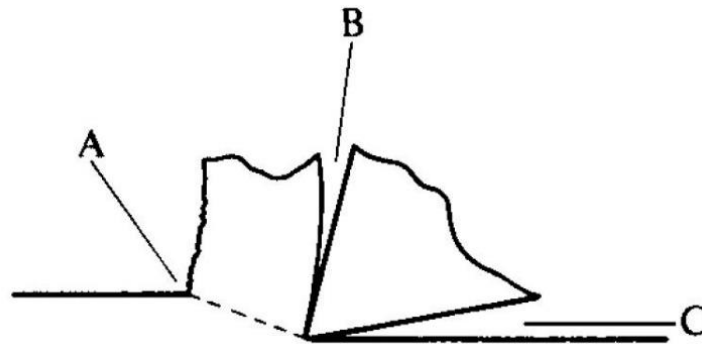
Syntetické oleje jsou oproti minerální vyrobeny bez použití ropy, mají delší životnost, vyšší bod vzplanutí, lépe odvádějí teplo a jsou méně zdravotně i ekologicky závadné. Mazací schopnost je ovšem nižší. I zde jsou přidány prvky pro zvýšení pevnosti filmu nebo ochranu před plísňemi. Nevýhodou je jejich pěnivost, nadměrná zásaditost a problémy při likvidaci. Díky průhlednosti je možné snadno kontrolovat řezný proces a čistotu. Polosyntetické oleje obsahují 5-30 % minerálního oleje, čímž získají lepší mazací vlastnosti. [70] [72]

2.7.2.3 Pevná maziva

Do této skupiny patří zejména grafit a sulfid molybdeničitý (MoS_2). Jejich atomy se skládají po vrstvách, mezi kterými působí slabé síly, a tak se od sebe snadno oddělují, čímž vytvářejí tenký film. To zaručuje dobré mazací schopnosti, zmenšení řezné síly, kontaktu třísky s nástrojem, tvorby tepla a drsnosti povrchu. Mazací vrstva má vysokou pevnost a odolnost proti vysokým teplotám, proto je oproti kapalinám účinnější při vysokých řezných rychlostech. Pokud však dojde k porušení mazací vrstvy, pevná maziva nejsou schopna obnažené místo zaplavit jako jiná prostředí. [78] [79]

2.7.3 Přívod řezné kapaliny

Způsob a směr přívodu řezné kapaliny má vliv zejména na životnost nástroje a jakost obrobené plochy. Řezná kapalina může být přivedena ze tří hlavních směrů (A, B, C), jak zobrazuje Obrázek 23. Přívod na hřbet chladí přímo břit, zatímco přívod ze strany čela (B) má jednak chladicí účinek, jednak zlepšuje lámání a odchod třísky. Může však urychlovat opotřebení ve tvaru žlábků. [74] [80]



Obrázek 23: Směry přívodu kapaliny při ortogonálním řezání (podle [74], upraveno)

Konvenčně se kapalina přivádí ze strany obrobku (směr A) za nízkého tlaku tryskou. Kapalina je však přiváděna v poměrně velkém množství (až 15 l/min v závislosti na čerpadle a nastavení škrťacího ventilu) s cílem zaplavit nástroj s obrobkem. V první řadě je ale zasažena tříska s obrobkem a až poté nástroj. Na břit se vzhledem k přivedenému objemu dostane jen několik procent kapaliny. Soustava je obvykle recirkulační, tedy vybavena sběrnou nádrží, čerpadlem a rozvodným potrubím zakončeným pevnou, nebo modulárně nastavitelnou výstupní tryskou. [69] [81] [82]

Při tlakovém chlazení je kapalina aplikována pod tlakem 5 až 200 barů v závislosti na průměru výstupního otvoru. Při obrábění korozivzdorných ocelí se jako výhodné ukazují tlaky do 100 barů, vyšší hodnoty jsou používány pro žáruvzdorné materiály. Přívod kapaliny může být řešen externím potrubím připojeným k držáku nástroje, ale moderní soustružnické nástroje bývají vybaveny vnitřními kanálky. Tím je možno zajistit přívod ze směrů B a C. Díky zvýšenému tlaku kapalina lépe proniká mezi stykové plochy, tedy se zlepší chladicí a mazací účinek. Podle zdroje [83] dochází použitím vnitřního přívodu kapaliny při obrábění korozivzdorných ocelí ke zvýšení životnosti nástroje o 30 až 150 %. Tlaková kapalina navíc zlepšuje lámání třísky. Oproti konvenčnímu chlazení je soustava vybavena okruhem s tlakovým čerpadlem (oba systémy lze kombinovat). K tomu musí být pracovní prostor stroje zakrytován, jelikož se kapalina rozstříkuje a vzniklá mlha představuje zdravotní riziko pro obsluhu. [70] [81] [84]

Mlha, resp. rozptýlené částice kapaliny ve vzduchu, může být taktéž použita. Výstupní tryskou je vypouštěn rozpínající se vzduch, který unáší řeznou kapalinu. Taková aplikace dobře odvádí teplo i přes menší spotřebu kapaliny oproti předchozím způsobům. Pozorovanou nevýhodou je ucpávání výstupní trysky a nepochybně také vdechování mlhy obsluhou. Mlha se taktéž používá v metodě MQL (minimální množství maziva), která se přibližuje suchému obrábění (množství přivedeného maziva 5-200 ml/hod). Rozprášený čistý olej účinně snižuje tření, a tedy vznik tepla, ale nemá tak efektivní chladicí a čisticí účinky. Přívod média k noži může být řešen externě i vnitřně s výstupem na hřbet a čelo nástroje. [31] [70]

3 Zhodnocení a návrh vlastního řešení

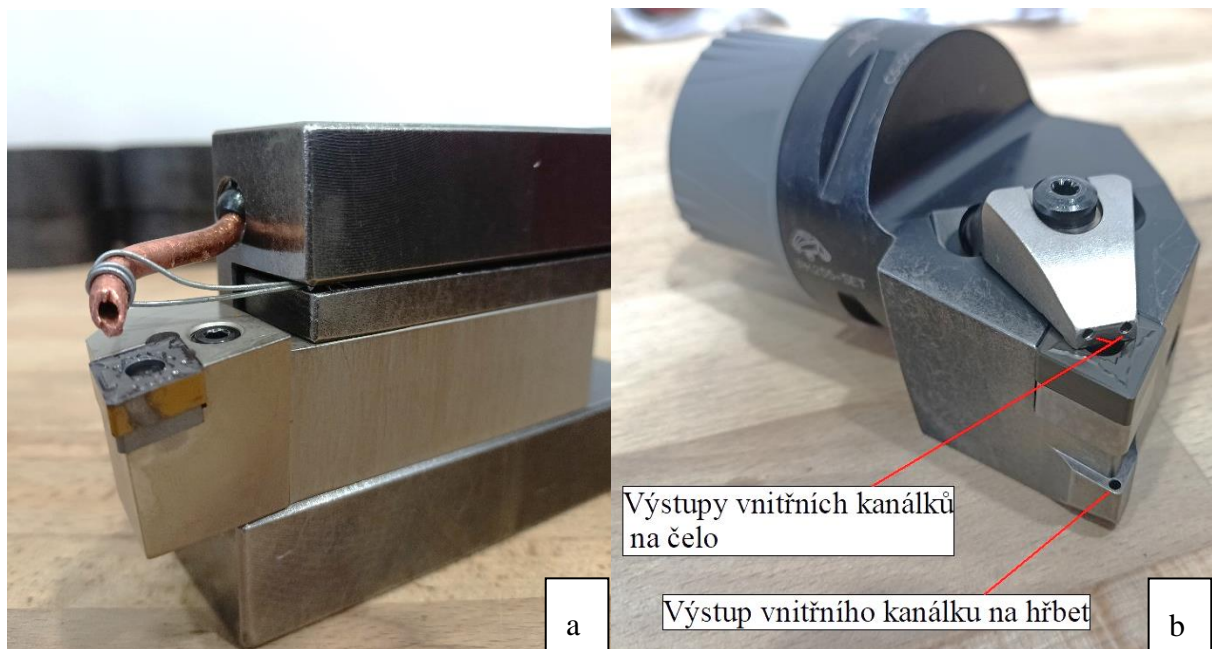
Tlakové chlazení bylo úspěšně aplikováno v práci Kince [83] při soustružení nástrojové oceli s výsledkem prodloužení životnosti nástroje o 18 až 25 %. Vnitřní chlazení použil Rehák při soustružení titanové slitiny, která má podobně jako korozivzdorná oceli špatnou tepelnou vodivost. Výsledkem bylo prodloužení životnosti nástroje o 22 % [84]. Výrobce nástrojů s vnitřním chlazením uvádí o 30 až 150 % delší životnost při obrábění korozivzdorných ocelí a až o 100 % vyšší řeznou rychlost při stejné životnosti. Tyto zdroje vedou k předpokladu zvýšení životnosti nástroje pomocí vnitřního přívodu kapaliny za vysokého tlaku i při soustružení korozivzdorných ocelí. V rámci práce byl proveden následující experiment.

3.1 Experiment

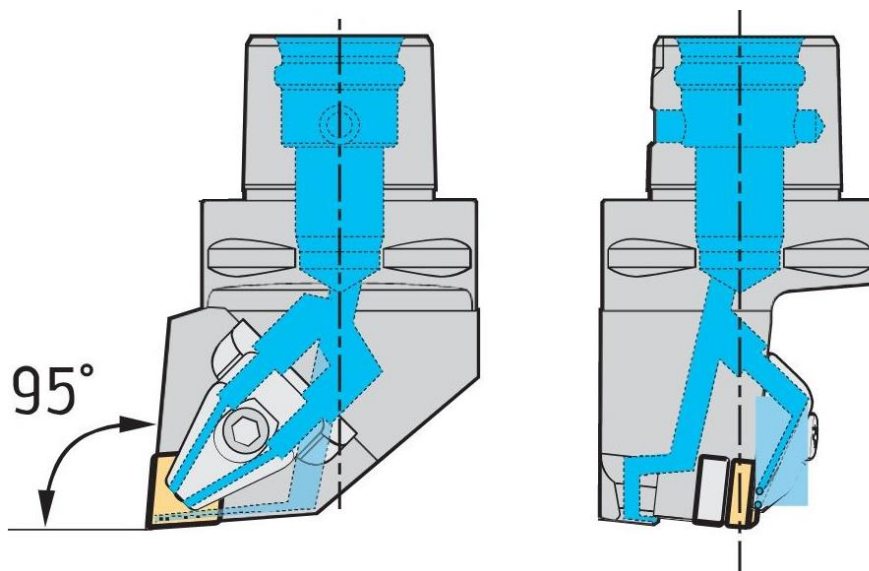
Cílem experimentu je porovnat závislost míry opotřebení nástroje na čase při obrábění korozivzdorné oceli. Porovnány budou dva nástroje, první s vnějším přívodem řezné kapaliny, druhý při použití vnitřního přívodu kapaliny na čelo i hřbet nástroje.

3.1.1 Nástroje

- Nástroj s konvenčním přívodem řezné kapaliny (Obrázek 24a)
- Nástroj s vnitřním přívodem řezné kapaliny C5-DCLNL-35060-12-P (Obrázek 24b a Obrázek 25)






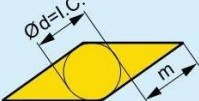

Obrázek 24: a) Nástroj s konvenčním přívodem kapaliny; b) Nástroj s vnitřním přívodem kapaliny (foto autor)

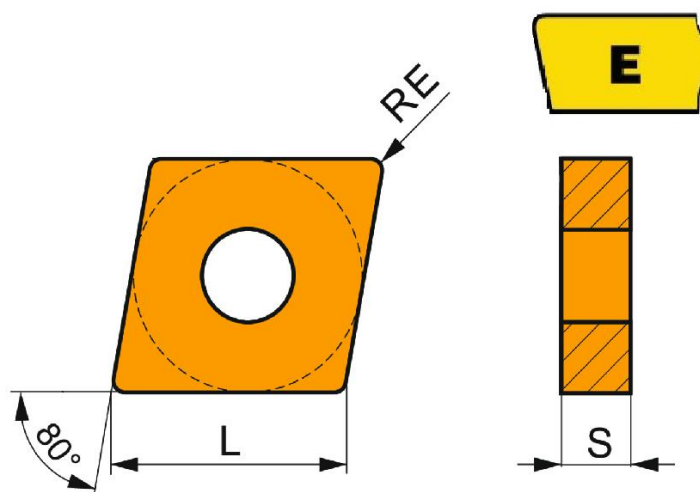


Obrázek 25: Schéma vnitřního přívodu řezné kapaliny nástrojem [85]

3.1.2 Vyměnitelná břitová destička

Pro oba testované nástroje byla použita VBD typu CNMG 120408E-NMR:T7325 od výrobce Dormer Pramet s.r.o. Jde o negativní oboustrannou soustružnickou VBD ze slinutého karbidu s MTCVD povlakem vhodnou pro hrubovací i dokončovací operace. Základní geometrickou specifikaci VBD poskytuje Obrázek 26 a Tabulka 5.

C	N	G		
				
M		$m (\pm)$	$s (\pm)$	$d = I.C. (\pm)$
		$0,08 \pm 0,18$	$0,130$	$0,05 \pm 0,13$
				



Obrázek 26: Specifikace použité VBD (vytvořeno podle [86] a [87])

Tabulka 5: Specifikace použité VBD

Tvar destičky	C – Tvar kosodélníku s úhlem špičky 80°
Úhel hřbetu	N – 0°
Tolerance rozměrů m, s, d	M
Provedení	G
Délka řezné hrany L	12 – 12,7 mm
Tloušťka S	04 – 4,76 mm
Rádus špičky Re	08 – 0,8 mm
Provedení řezné hrany	E (se zaoblenou hranou)
Utvařec	NMR

3.1.3 Polotovár

Experiment byl realizován na dvou kruhových tyčích o délce 300 mm a výchozím průměru 200 mm. Materiálem byla ocel AISI 316 (složení viz Tabulka 6). Jedná se o austenitickou ocel s vyšším obsahem molybdenu, který zvyšuje odolnost proti korozi. Zároveň molybden zvyšuje pevnost při namáhání za tepla. Vyšší odolnost proti korozi znamená horší obrobiteľnosť (viz kapitola 2.5) a se zvyšováním pevnosti rostou řezné síly. [88]

Tabulka 6: Složení oceli AISI 316 [89]

[%]	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	C	P	S
Min.	62	16	10	2	0	0	0	0	0	0
Max.	72	18	14	3	2	0,75	0,1	0,08	0,045	0,03

3.1.4 Podmínky experimentu

Pro experiment byly v jeho průběhu navrženy tři řezné rychlosti (160, 250 a 300 m/min), přičemž posuv na otáčku a hloubka řezu vždy zůstala konstantní (Tabulka 7). Vlivem upnutí v čelistech sklíčidla byla obráběná délka polotovaru 282 mm. Jako řezná kapalina byla použita 6% emulze přivedená tlakem 40 bar.

Tabulka 7: Řezné podmínky experimentu

Parametr:	Hodnota:	Jednotka:
Řezná rychlost v_c	160/250/300	[m/min]
Posuv na otáčku f_{ot}	0,25	[mm/ot.]
Hloubka řezu a_p	1,5	[mm]

3.1.5 Stroj

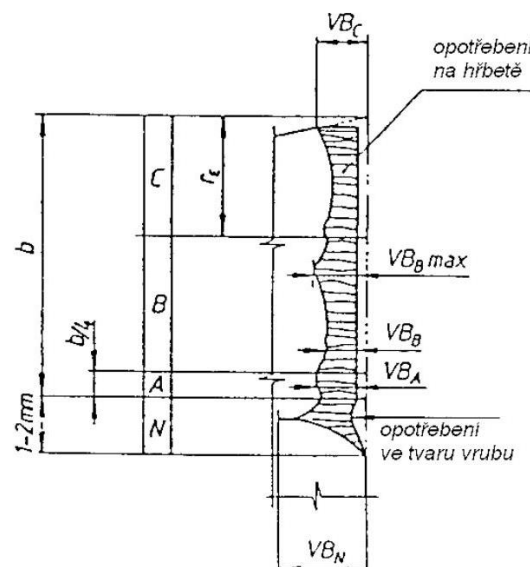
Experiment se uskutečnil na stroji DMG MORI CTX BETA 1250 TC (pracovní prostor viz Obrázek 27), který je ve vybavení laboratoře obrábění na RTI v Plzni. Jedná se o soustružnicko-frézovací centrum schopné pojmout obrobek o maximálním průměru 500 mm a délce 1 200 mm. Otáčky na hlavním vřetení jsou variabilní s maximální hodnotou 5 000 otáček za minutu. Tlak chladicí kapaliny dosahuje až 100 bar.



Obrázek 27: Pracovní prostor stroje DMG MORI CTX BETA 1250 TC (foto autor)

3.1.6 Měření a vyhodnocení opotřebení VBD

K měření opotřebení byl využit digitální mikroskop KEYENCE VHX-6000 a přidružený software umožňující odměřování vzdáleností. Vzhledem k tomu, že je tato metoda měření hodnot závislá na lidském faktoru, nelze naměřené hodnoty brát zcela kategoricky. Po každém řezu byly zaznamenány snímky čela a hřbetu VBD a vyhodnoceno jeho opotřebení. Norma ISO 3685 rozeznává více typů opotřebení hřbetu (VB), a to VB_c v oblasti špičky nástroje, VB_N ve formě vrubu, VB_B v přímé části ostří a maximální opotřebení VB_{Bmax} . (Obrázek 28). Pro testy byla stanovena kritériální hodnota $VB_{Bkrit}=0,4$ mm, po jejímž překročení byla VBD prohlášena za nezpůsobilou. [90]



Obrázek 28: Opotřebení hřbetu nástroje podle ISO 3685 [90]

3.1.7 Test 1

První test byl proveden při řezné rychlosti $v_c=160$ m/min, což je maximální rychlost při soustružení korozivzdorných ocelí pro danou VBD dle výrobce. Naměřené a vypočtené hodnoty uvádí Tabulka 8 a Tabulka 9.

Tabulka 8: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 1 – nástroj s vnějším chlazením

Nástroj s vnějším chlazením; $v_c=160$ m/min					
Řez	Koncový průměr – D [mm]	Otáčky – n [s^{-1}]	Čas v řezu [min]	VB_B [mm]	Celkový čas v řezu [min]
1	197	259	4,361	0,073	4,361
2	188	271	4,162	0,092	8,523
3	179	285	3,963	0,094	12,485
4	176	290	3,896	0,098	16,381
5	167	305	3,697	0,106	20,078

Tabulka 9: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 1 – nástroj s vnitřním chlazením

Nástroj s vnitřním chlazením; $v_c=160$ m/min					
Řez	Koncový průměr – D [mm]	Otáčky – n [s^{-1}]	Čas v řezu [min]	VB_B [mm]	Celkový čas v řezu [min]
1	194	263	4,295	0,073	4,295
2	185	275	4,095	0,075	8,390
3	182	280	4,029	0,077	12,419
4	173	295	3,830	0,079	16,249
5	170	300	3,763	0,080	20,012

Jelikož při testu docházelo k malému přírůstku opotřebení a nebyl předpoklad, že by v následujících řezech došlo ke kritériálnímu opotřebení, byl tento test z hospodárných důvodů ukončen.

3.1.8 Test 2

Z důvodu nízké míry opotřebení při Testu 1 byl zařazen Test 2 se zvýšenou řeznou rychlostí $v_c=300$ m/min. Po této úpravě lze předpokládat rychlejší tvorbu opotřebení hřbetu. Naměřené a vypočtené hodnoty uvádí Tabulka 10 a Tabulka 11.

Tabulka 10: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 2 – nástroj s vnějším chlazením

Nástroj s vnějším chlazením; $v_c=300$ m/min					
Řez	Koncový průměr – D [mm]	Otáčky – n [s^{-1}]	Čas v řezu [min]	VB_B [mm]	Celkový čas v řezu [min]
1	161	593	1,901	0,079	1,901
2	152	629	1,795	0,146	3,695
3	149	641	1,759	Destrukce břitu	5,455

Z naměřených dat lze vyčíst, že opotřebení nástroje s vnějším chlazením proběhlo příliš rychle na to, aby se dalo zaznamenat. Již během třetího řezu došlo k destrukci břitu a test nemohl pokračovat. Norma ISO 3685 doporučuje alespoň 5 bodů pro odhad dosažení kritériálního opotřebení, a proto výsledky tohoto měření nelze považovat za směrodatné.

Tabulka 11: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 2 – nástroj s vnějším chlazením

Nástroj s vnitřním chlazením; $v_c=300$ m/min					
Řez	Koncový průměr – D [mm]	Otáčky – n [s^{-1}]	Čas v řezu [min]	VB_B [mm]	Celkový čas v řezu [min]
1	158	605	1,865	0,075	1,865
2	155	616	1,830	0,078	3,695
3	146	654	1,724	0,100	5,419
4	143	668	1,688	0,106	7,107
5	140	682	1,653	0,124	8,760
6	137	697	1,617	0,296	10,378
7	134	713	1,582	Destrukce břitu	11,960

U nástroje s vnitřním chlazením je patrná delší životnost, nicméně během 7. řezu došlo k destrukci břitu (Obrázek 29) před dosažením kritériálního opotřebení. Jelikož ani jeden z nástrojů nedosáhl kritériálního opotřebení, nelze vzhledem k němu porovnat rozdíl životností.



Obrázek 29: Test 2 – destrukce břitu VBD nástroje s vnitřním chlazením po 7. řezu (zvětšeno 100x);
foto autor

3.1.9 Test 3

Jelikož při Testu 2 došlo k nadměrnému opotřebení nástroje s vnějším chlazením již během třetího řezu, byl zařazen Test 3, při kterém byla zvolena řezná rychlost $v_c=250$ m/min. Vzhledem ke zmenšujícímu se průměru obrobku, respektive času obrábění bylo od $\varnothing 107$ mm opotřebení měřeno po dvou přejezdech. Po dosažení $\varnothing 74$ mm byl upnut nový polotovar. Naměřené a vypočtené hodnoty uvádí Tabulka 12 a Tabulka 13.

Tabulka 12: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 3 – nástroj s vnějším chlazením

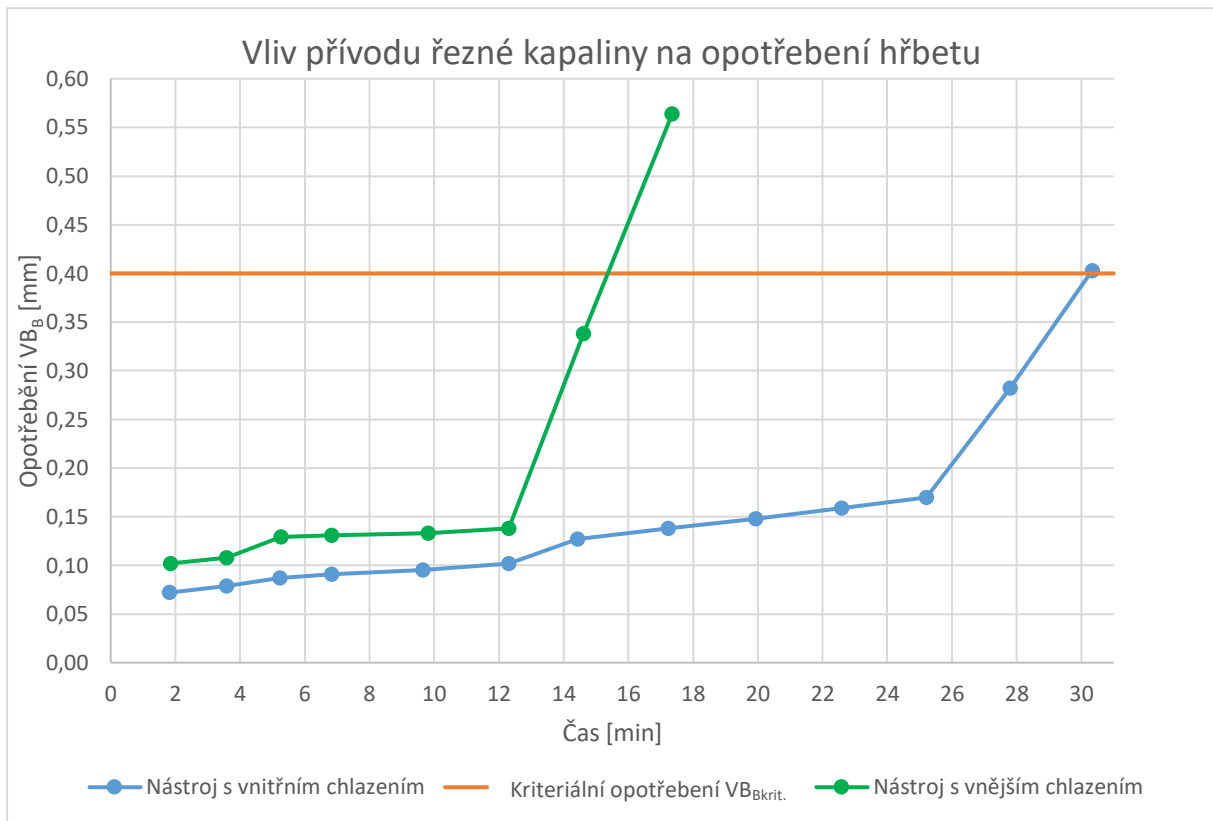
Nástroj s vnějším chlazením; $v_c=250$ m/min					
Řez	Koncový průměr – D [mm]	Otáčky – n [s^{-1}]	Čas v řezu [min]	VB_B [mm]	Celkový čas v řezu [min]
1	131	608	1,856	0,102	1,856
2	122	653	1,728	0,108	3,584
3	119	669	1,686	0,129	5,270
4	110	724	1,558	0,131	6,829
5	104	766	2,989	0,133	9,818
6	86	926	2,479	0,138	12,298
7	80	995,2229	2,309	0,338	14,607
Lineární interpolace na $VB_{Bkrit.}$				0,400	15,361
8	194	410,4012	2,749	0,564	17,355

Tabulka 13: Naměřené a vypočítané hodnoty – Test 3 – nástroj s vnitřním chlazením

Nástroj s vnitřním chlazením; $v_c=250$ m/min					
Řez	Koncový průměr – D [mm]	Otáčky – n [s^{-1}]	Čas v řezu [min]	VB_B [mm]	Celkový čas v řezu [min]
1	128	622,0	1,813	0,072	1,813
2	125	636,9	1,771	0,079	3,584
3	116	686,4	1,643	0,087	5,228
4	113	704,6	1,601	0,091	6,829
5	98	812,4	2,819	0,095	9,648
6	92	865,4	2,649	0,102	12,298
7	74	1075,9	2,139	0,127	14,437
8	197	404,2	2,791	0,138	17,228
9	191	416,8	2,706	0,148	19,934
10	188	423,5	2,664	0,159	22,597
11	185	430,4	2,621	0,170	25,218
12	182	437,5	2,579	0,287	27,797
Lineární interpolace na $VB_{Bkrit.}$				0,400	30,270
13	179	444,8	2,536	0,403	30,333

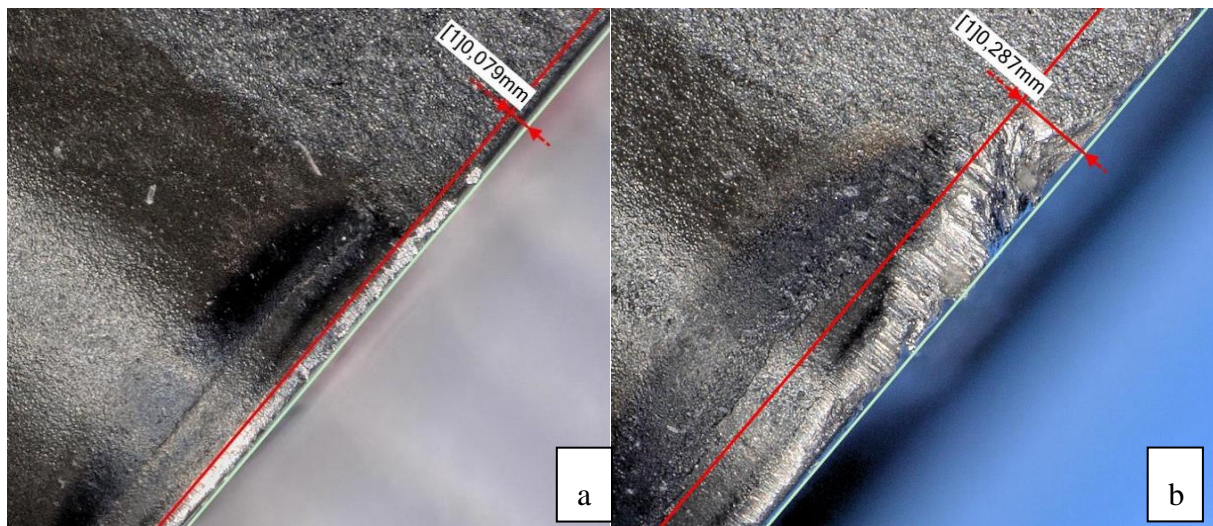
Pro oba nástroje byl pomocí lineární interpolace spočítán čas, při kterém je teoreticky dosaženo kritériálního opotřebení $VB_{Bkrit.}=0,4$ mm. Při použití nástroje s vnějším chlazením bude toto opotřebení dosaženo po 15,361 minutách, zatímco při použití nástroje s vnitřním chlazením po 30,27 minutách. To představuje nárůst životnosti nástroje o 97 %. Oproti doporučené řezné rychlosti výrobce 160 m/min byla použita řezná rychlost 250 m/min, což představuje zvýšení o 56 %.

Porovnání průběhu opotřebení je zaneseno do grafu (Obrázek 30).



Obrázek 30: Graf závislosti míry opotřebení hřbetu na použitém chlazení; $v_c = 250$ m/min

Způsob měření a přírůstek opotřebení hřbetu mezi 2. a 12. řezem při použití vnitřního přívodu zobrazuje Obrázek 31.



Obrázek 31: Test 3 – opotřebení VBD nástroje s vnitřním chlazením; a) po 2. řezu; b) po 12. řezu (zvětšeno 100x); foto autor

4 Závěr

Neustále rostoucí spotřeba korozivzdorných ocelí je spojena s jejich jedinečnými vlastnostmi, a to nejen s odolností proti korozi. Díky široké variabilitě tří základních struktur dosahují tyto materiály všestranných vlastností nejen pro průmyslová odvětví. Vlastnosti korozivzdorných ocelí mohou být výhodné např. při svařování nebo tváření, nicméně obrábění korozivzdorných ocelí se potýká se specifickými problémy.

Z provedené rešerše byla jako problematická označena zejména nízká tepelná vodivost korozivzdorné oceli a vzniklé následky projevující se rychlým opotřebením nástroje a nízkou produktivitou. Teoreticky bylo řešeno i zvýšení pevnosti a tvrdosti obrobeného materiálu vlivem deformačního zpevnění.

Možným řešením rychlého opotřebení je použití optimalizovaného chlazení s přívodem řezné kapaliny vnitřkem nástroje přímo na hřbet a čelo nástroje do místa řezu. Vzhledem ke kladnému vlivu, který byl u této metody popsán autory a výrobcí zabývajících se podobnou tematikou, byl proveden experiment potvrzující prodloužení životnosti.

Cílem experimentu bylo ověřit, zda bude mít vnitřní přívod kapaliny kladný vliv i při soustružení korozivzdorné oceli. Provedení experimentu spočívalo ve třech testech, kdy bylo porovnáno opotřebení hřbetu vyměnitelné břitové destičky při vnitřním a vnějším přívodu řezné kapaliny. Následné vyhodnocení naplnilo předpoklady vkládané do vnitřního přívodu. Nástroj s vnitřním přívodem kapaliny dosáhl delší životnosti o 97 % při zvýšení řezné rychlosti o 56 % oproti maximální udávané hodnotě výrobce břitové destičky. Tím se potvrdily hodnoty výrobce nástroje s vnitřním chlazením. Rozdílná rychlost růstu opotřebení byla znatelná zejména při zvýšených řezných rychlostech. I při vyšších rychlostech neměl růst opotřebení vnitřně chlazeného nástroje takovou dynamiku jako nástroj s vnějším chlazením, což přispívá k lepšímu odhadu opotřebení a kontrole řezného procesu v dalších řezech.

Výstupem této práce je potvrzení kladného vlivu přívodu řezné kapaliny vnitřkem nástroje do místa řezu, které se projevuje prodloužením životnosti nástroje. Další výhodou je možnost použití vyšších řezných rychlostí. Tyto znaky mají kladný vliv na produktivitu obrábění méně častým zásahem kvůli výměně břitové destičky a snížením potřebného strojního času na obrobení součásti.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ISSF Website - Power generation. *SSF Website - Home of stainless steels* [online]. [vid. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.worldstainless.org/applications/industrial-applications/power-generation/>
- [2] CHUANGPENG. An Absolute Stainless Steel Building That Is Changing The Constructing Game. *Foshan JinLing Steel Solutions Co, Ltd.* [online]. 2020 [vid. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.jinlingsteel.com/article/an-absolute-stainless-steel-building-that-is-changing-the-constructing-game.html>
- [3] Global stainless steel melt shop production 2020. *Statista* [online]. [vid. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/223028/world-stainless-steel-production/>
- [4] KŘÍŽ, Antonín. Oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné. In: *4. přednáška* [online]. [Videozáznam online]. Plzeň. 14. říjen 2020. Dostupné z: https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1hXa8lFvzSyrGW6L_o1n_1Az7kMepiagp
- [5] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. 1. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická (Academia), 1999. ISBN 80-200-0671-0.
- [6] NĚMEC, Karel. Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli [online]. nedatováno [vid. 2021-10-28]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/06%20-%20Korozivzdorne%20a%20zaruvzdorne%20oceli.pdf
- [7] VLACH, Bohumil. Úloha 12. Mechanické vlastnosti pevných látek (zejména kovů) [online]. nedatováno, 22. Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/chemsekc/c8870/pdf/Uloha12_mechan_vl.pdf
- [8] AHMED, Yassmin Seid, German FOX-RABINOVICH, Jose Mario PAIVA, Terry WAGG a Stephen Clarence VELDHUIS. Effect of Built-Up Edge Formation during Stable State of Wear in AISI 304 Stainless Steel on Machining Performance and Surface Integrity of the Machined Part. *Materials* [online]. 2017, **10**(11), 1230 [vid. 2022-04-02]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10111230
- [9] SANDVIK COROMANT. *Obráběné materiály* [online]. [vid. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [10] SANDVIK COROMANT. *Jak postupovat při soustružení různých typů materiálů* [online]. [vid. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-do-turning-in-different-materials.aspx>
- [11] GIETERIJ BENNINK EN TEN CATE HEERENVEEN BV. *MartensitischRVS1.jpg (1596×1196)* [online]. [vid. 2021-12-03]. Dostupné z: <http://www.bennink-tencate.com/upload/images/legeringen/MartensitischRVS1.jpg>
- [12] ČERNÝ, Miroslav. Rozdělení pevných látek. In: [online]. Brno. Dostupné z: http://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/vyuka/1_Struktura.pdf

- [13] OUTOKUMPU. *Handbook of Stainless Steel* [online]. Espoo: Outokumpu Oyj, 2013. Dostupné z: <http://www.steel-stainless.org/media/1546/outokumpu-stainless-steel-handbook.pdf>
- [14] BRENNER, Otakar. Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály | MM Průmyslové spektrum. *www.mmspektrum.com* [online]. 23. duben 2003 [vid. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy>
- [15] TAVARES, Sérgio Souto Maior, Luis Felipe Guimarães de SOUZA, Tatiane de Campos CHUVAS, Cássio Lapate da Costa MACHADO a Brígida Bastos de ALMEIDA. Influence of heat treatments on the microstructure and degree of sensitization of base metal and weld of AISI 430 stainless steel. *Matéria (Rio de Janeiro)* [online]. 2018, **22**(suppl 1) [vid. 2021-12-04]. ISSN 1517-7076. Dostupné z: doi:10.1590/s1517-707620170005.0275
- [16] AHMED, Yassmin Seid, Jose Mario PAIVA, Bipasha BOSE a Stephen Clarence VELDHUIS. New observations on built-up edge structures for improving machining performance during the cutting of superduplex stainless steel. *Tribology International* [online]. 2019, **137**, 212–227 [vid. 2022-04-02]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2019.04.039
- [17] CARPENTER TECHNOLOGY CORPORATION. Cartech® Custom 630 Stainless. *Carpenter Technology* [online]. 2020 [vid. 2022-04-03]. Dostupné z: [https://www.carpentertechnology.com/hubfs/7407324/Material%20Safety%20Data%20Sheets/Custom%20630%20\(17-4%20PH\).pdf](https://www.carpentertechnology.com/hubfs/7407324/Material%20Safety%20Data%20Sheets/Custom%20630%20(17-4%20PH).pdf)
- [18] *Stainless steel grades listed in the international standard ISO 15510:2010* [online]. B.m.: Ugitech SA. Dostupné z: https://www.ugitech.com/fileadmin/user_upload/Ugitec/Documents_publics/Certifications/iso15510.pdf
- [19] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu 2*. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [20] EUROPEAN STEEL AND ALLOY GRADES. *X5CrNi17-7 / 1.4319 - SteelNumber - Chemical composition, equivalent, properties* [online]. [vid. 2022-05-24]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=112
- [21] KRÍŽ, Antonín. Značení ocelí. In: *2. přednáška* [online]. Plzeň. 12. říjen 2020. Dostupné z: https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1hXa8lFvzSyrGW6L_o1n_1Az7kMepiagp
- [22] INOXMARE S.R.L. *Steels Designations – Here the AISI Standards* [online]. 19. červenec 2018 [vid. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://blog.inoxmare.com/eng/2018/07/19/steels-designations-aisi-standards/>
- [23] DOUVILLE, Jonathan. Passivation basics: Will this stainless steel rust? *The FABRICATOR* [online]. [vid. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/testingmeasuring/passivation-basics-will-this-stainless-steel-rust->

- [24] EURO INOX. *The self-repair mechanism of stainless steel* [online]. 2002. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Self_Repair_EN.pdf
- [25] DELSTAR METAL FINISHING, INC. Stainless Steel Passivation - ASTM A 967 | Delstar Metal Finishing, Inc. *Metal Finishing Services | Delstar Metal Finishing, Inc.* [online]. [vid. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.delstar.com/passivating>
- [26] META WELD S.R.O. *Chemické přípravky pro úpravu povrchu nerezavějících ocelí. Příručka moření.* [online]. Praha: voestalpine Böhler Welding, nedatováno. Dostupné z: [https://www.metaweld.cz/out/media/prirucka-pro-moreni-a-pasivaci%20\(1\).pdf](https://www.metaweld.cz/out/media/prirucka-pro-moreni-a-pasivaci%20(1).pdf)
- [27] BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION. *Calculation of PREN – British Stainless Steel Association* [online]. [vid. 2022-04-10]. Dostupné z: https://bssa.org.uk/bssa_articles/calculation-of-pren/
- [28] SECO TOOLS a Patrick DE VOS. *Getting technical series – Machining of stainless steel* [online]. 2021 [vid. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=PsXWMEUXmNs>
- [29] HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění - 1. část* [online]. Brno: VUT Brno, 2003. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [30] PŘIKRYL, Zdeněk a Rosa MUSÍLKOVÁ. *Teorie obrábění.* Praha: Nakladatelství technické literatury, 1971.
- [31] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie výroby II* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství, 2002. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TechnVyroby_II.pdf
- [32] STRNAD, Tomáš. *Obrobitelnost austenitické ocele* [online]. Plzeň: Katedra technologie obrábění, 2011. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=43007>
- [33] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění.* Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [34] VYŠATA, Jiří. *Základy obrábění - tvoření třísky, charakteristiky, projevy.* In: 3. přednáška. Plzeň. 10. březen 2021.
- [35] GROOVER, Mikell P. *Fundamentals of modern manufacturing-materials, processes and systems* [online]. 4. vyd. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010. ISBN 978-0470-467002. Dostupné z: <https://www.fcusd.org/cms/lib/CA01001934/Centricity/Domain/4529/Fundamentals%20of%20Modern%20Manufacturing%20Materials%20%20Processes%20and%20Systems%20%204th%20Edition.pdf>
- [36] KORKUT, Ihsan, Mustafa KASAP, Ibrahim CIFTCI a Ulvi SEKER. *Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel.* *Materials & Design* [online]. 2004, **25**(4), 303–305 [vid. 2022-03-12]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2003.10.011

- [37] VYŠATA, Jiří. Základy obrábění - základní pojmy, řezný nástroj, obrobitelnost. In: *I. přednáška*. Plzeň. 3. březen 2021.
- [38] *CoroKey: Soustružení : Frézování : Vrtání*. Praha: Sandvik Coromant, 2010.
- [39] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky: pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-20-3.
- [40] ESTUDIO.CZ. *Jakosti nerezových materiálů* [online]. [vid. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.inerez.cz/jakosti-nerezovych-materialu/>
- [41] *Ferona online - Značení ocelí* [online]. [vid. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-oceli/?typ=3>
- [42] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Jak rozpoznat správné utváření třísek? | MM Průmyslové spektrum. www.mmspektrum.com [online]. 11. duben 2012 [vid. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-rozpoznat-spravne-utvareni-trisek>
- [43] DAVIS, J. R. a ASM INTERNATIONAL, ed. *Stainless steels*. Materials Park, Ohio: ASM International, 1994. ASM specialty handbook. ISBN 978-0-87170-503-7.
- [44] International Stainless Steel Forum (ISSF) [online katalogový list]. *Martensitic Stainless Steels* [online]. nedatováno. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Martensitic_Stainless_Steels.pdf
- [45] HOLUB, Václav. *Utváření ocelových třísek při soustružení materiálů FV „535“ a FV „448“ ve firmě Precision Castparts CZ s.r.o.* [online]. Plzeň, 2012. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/4239/1/Utvareni%20ocelovych%20trisek%20pri%20soustruzeni%20materialu%20FV%20535%20a%20FV%20448%20ve%20firme%20Precision%20Castparts%20CZ%20s.r.o..pdf>
- [46] TERRIEN, Pascal a Pierre PEDDARE. Ferritic stainless steel with improved machinability [online]. United States Patent 5,496,515. davis. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/26/0c/94/8b6f6f45898f62/US5496515.pdf>
- [47] JANDERA, Michal, Břetislav ŽIDLICKÝ a Marek ŠORF. *Příručka pro navrhování konstrukcí z korozivzdorné oceli: 4. vydání*. [online]. 2017. ISBN 978-80-01-06395-8. Dostupné z: <http://www.steel-stainless.org/media/1483/dmsss-cz.pdf>
- [48] *High-temperature characteristics of stainless steels* [online]. B.m.: Nickel development institute, nedatováno. A Designers Handbook, 9004. Dostupné z: https://nickelinstitute.org/media/1699/high_temperaturecharacteristicsofstainlesssteel_9004_.pdf
- [49] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. čes. vyd. Praha: Sandvik 45 s., I-2 - XIII-33 s., 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [50] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Obrobitelnost nerezových ocelí | MM Průmyslové spektrum. www.mmspektrum.com [online]. 15. únor 2012 [vid. 2022-02-22].

- Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-obrobitelnost-nerezovych-oceli>
- [51] TEKINER, Zafer a Sezgin YEŞILYURT. Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design* [online]. 2004, **25**(6), 507–513 [vid. 2022-02-22]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2003.12.011
- [52] MAHDAVINEJAD, R A a S SAEEDY. Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel. *Sadhana* [online]. 2011, **36**(6), 963–970 [vid. 2022-03-01]. ISSN 0256-2499, 0973-7677. Dostupné z: doi:10.1007/s12046-011-0055-z
- [53] SECO TOOLS CZ, S.R.O. *Nerezová ocel a rovnováha klíčových faktorů při jejím obrábění* | *Secotools.com* [online]. 12. květen 2018 [vid. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/21497?language=cs>
- [54] LIN, W S. The study of high speed fine turning of austenitic stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* [online]. 2008, **27**(2), 4. Dostupné z: http://jamm.acmsse.h2.pl/papers_vol27_2/27219.pdf
- [55] KŘÍŽ, Antonín. Korozivzdorné oceli – vlastnosti a souvislosti s obráběním. In: *10. přednáška* [online]. Plzeň. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kmm/mo/prednasky.html>
- [56] KINSMAN, Nicole. *Practical guidelines for the fabrication of austenitic stainless steels* [online]. 2. vyd. Londýn: International Molybdenum Association, 2020. ISBN 978-1-907470-13-4. Dostupné z: https://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Austenitics_fabrication.pdf
- [57] LLEWELLYN, D. T a R. C HUDD. *Steels metallurgy and applications* [online]. Oxford [England]; Boston: Butterworth-Heinemann, 2007 [vid. 2022-03-29]. ISBN 978-0-08-051776-6. Dostupné z: <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=1838>
- [58] VINOTHKUMAR, Mohan. *How does sulphur affect the transverse ductility of steels?* [online]. 2017 [vid. 2022-03-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/post/how_does_sulphur_affect_the_transverse_ductility_of_steels
- [59] VANVLACK, L.H. *Correlation of Machinability with Inclusion Characteristics in Resulphurized Bessemer Steels*. 45. 741-757: ASM International, 1953. TRANSACTIONS OF THE AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1953, 45: 741-757.
- [60] BABINSKÝ, Tomáš. *Rekrystalizace automatové oceli studované technikou in-situ SEM/EBSD* [online]. Brno, 2018. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=175892
- [61] AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. *Design Guidelines for the Selection and Use of Stainless Steel* [online]. B.m.: Nickel Institute. 2020 [vid. 2022-02-22]. Dostupné z: https://nickelinstitute.org/media/4664/ni_aisi_9014_selectionuse.pdf

- [62] GENG, Hongming, Xiaochun WU, Hongbin WANG a Yongan MIN. Effects of copper content on the machinability and corrosion resistance of martensitic stainless steel. *Journal of Materials Science* [online]. 2008, **43**(1), 83–87 [vid. 2022-03-14]. ISSN 0022-2461, 1573-4803. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-007-2084-x
- [63] ZANATTA, André, J GOMES, Celso BARBOSA a Alexandre SOKOLOWSKI. *INFLUENCE OF CALCIUM TREATMENT ON CHIP FORMATION OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL SAE303 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO COM CÁLCIO NA FORMAÇÃO DE CAVACO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO SAE303*. 2010.
- [64] BLETTON, O., R. DUET a P. PEDARRE. Influence of oxide nature on the machinability of 316L stainless steels. *Wear* [online]. 1990, **139**(2), 179–193 [vid. 2022-03-18]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/0043-1648(90)90044-B
- [65] VYŠATA, Jiří. Kapitoly obrábění. *Google Docs* [online]. [vid. 2022-03-20]. Dostupné z: https://docs.google.com/document/u/1/d/1Xy3VWKCRAOVANxs6fvywIguFIzwXdhI8zJ-4UEOFiUE/edit?usp=embed_facebook
- [66] ŘEHOŘ, Jan. *Teorie obrábění. Skripta k předmětu KTO/TO*. Plzeň: ZČU v Plzni, nedatováno.
- [67] HEMMATI, A., J.M. DEPAIVA a S.C. VELDHUIS. An in-depth investigation of the machining performance of Ti1-Xalxn PVD coatings during high-speed machining of 316 stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2022, **75**, 903–918 [vid. 2022-04-05]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2022.01.061
- [68] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Opatřebení se nevyhneme! | MM Průmyslové spektrum. www.mmspektrum.com [online]. [vid. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme>
- [69] YOUSSEF, Helmi A. *Machining of stainless steels and super alloys: traditional and nontraditional techniques*. Hoboken: John Wiley and Sons, 2015. ISBN 978-1-118-91936-1.
- [70] STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. *Metal cutting theory and practice*. Third edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 978-1-4665-8753-3.
- [71] BUMBÁLEK, Bohumil, Bohuslav OŠTÁDAL a Emil ŠAFR. *Řezné kapaliny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [72] JERSÁK, Jan a Alexey POPOV. *Ekologické obráběcí kapaliny nové generace*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-142-9.
- [73] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [74] SHAW, Milton Clayton. *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005. Oxford series on advanced manufacturing. ISBN 978-0-19-514206-8.

- [75] STEEL SHIELD TECHNOLOGIES (ASIA PACIFIC) LIMITED. *Steel Shield Machining Lubrication* [online]. [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: http://www.steelshieldtech.com.hk/Applications/Manufacturing_Machining_Metalworking&Preservative_Fluids.html
- [76] KOSTADIN, Tihana. Influence of Cutting Fluids on the Corrosion Resistance of X20Cr13 Martensitic Stainless Steel. *International Journal of Electrochemical Science* [online]. 2018, 11986–11999 [vid. 2022-04-17]. ISSN 14523981. Dostupné z: doi:10.20964/2018.12.81
- [77] PARAMO, a.s. [online katalogový list]. *Oleje a maziva pro průmysl* [online]. 2020 [vid. 2022-04-17]. Dostupné z: https://eshop.paramo.cz/data/Tiskoviny/MOGUL_prumyslove_oleje_a_maziva_2020.pdf
- [78] MAKHESANA, Mayurkumar Ashwinbhai a Kaushik M. PATEL. Investigation to study the applicability of solid lubricants in machining for clean and green manufacturing. *Industrial Lubrication and Tribology* [online]. 2016, **68**(5), 591–596 [vid. 2022-04-19]. ISSN 0036-8792. Dostupné z: doi:10.1108/ILT-03-2015-0037
- [79] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky. *Vazby v krystalech* [online]. 2006 [vid. 2022-04-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/628-vazby-v-krystalech>
- [80] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 978-80-214-2374-9.
- [81] Použití řezné kapaliny a chlazení při soustružení. *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning.aspx>
- [82] Bodově přesný paprsek chladicího média | MM Průmyslové spektrum. www.mmspektrum.com [online]. [vid. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/bodove-presny-paprsek-chladiciho-media>
- [83] WALTER TOOLS. Walter Turn – precizní chlazení. *Walter Tools* [online]. [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.walter-tools.com/cs-cz/tools/standard_products/turning/overview/iso_turning/turn-precision-cooling/pages/default.aspx
- [84] NAVES, V.T.G., M.B. DA SILVA a F.J. DA SILVA. Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel. *Wear* [online]. 2013, **302**(1–2), 1201–1208 [vid. 2022-05-07]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2013.03.016
- [85] WALTER TOOLS. C5-DCLNL-35060-12-P otočný držák – upnutí svorkou. *Walter Tools » Engineering Kompetenz* [online]. [vid. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/de-de/search/pages/default.aspx/product/c5-dclnl-35060-12-p>

- [86] LPS - NÁŘADÍ, NÁSTROJE S.R.O. *ISO - SYSTÉM ZNAČENÍ VYMĚNITELNÝCH BŘITOVÝCH DESTIČEK* [online]. Dostupné z: <https://www.naradi-nastroje.eu/prilohy/katalogy/britove-desticky-pramet.pdf>
- [87] DORMER PRAMET. *CNMG 120408E-NMR:T7325 / CNMG* [online]. [vid. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cz/en/p/7156198>
- [88] CIFTCI, Ibrahim. Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology International* [online]. 2006, **39**(6), 565–569 [vid. 2022-05-15]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2005.05.005
- [89] *AISI 316 (S31600) Stainless Steel*:: *MakeItFrom.com* [online]. [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-316-S31600-Stainless-Steel>
- [90] ČEP, Robert. *Měření opotřebení nástrojů* [online]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf