

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv tlaku chladicí kapaliny na životnost nástroje při soustružení slitin
titanu

Autor: **Bc. Ondřej ŠINDELÁŘ**

Vedoucí práce: **Ing. Luboš KROFT, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej ŠINDELÁŘ**
Osobní číslo: **S18N0014K**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie – technologie obrábění**
Téma práce: **Vliv tlaku chladicí kapaliny na životnost nástroje při soustružení slitin titanu**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Analýza současného stavu řešené problematiky
3. Návrh, realizace a vyhodnocení experimentálního měření
4. Technické hodnocení navržených variant
5. Zhodnocení a závěr



Doc. Ing. Jan Řehor, Ph.D.

Doc. Ing. Milan Šedl, Ph.D.

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

- Elektronické informační zdroje dostupné z www.knihovna.zcu.cz
- CIRP ANNALS – Manufacturing Technology: <http://www.cirp.net/>
- SANDVIK Coromant, Sandviken: Technická příručka obrábění, dostupné z www.sandvik.coromant.com
- <http://www.isf.de/de/index.html>
- Elektronické informační zdroje
- Interní podklady ZČU-KTO

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Kroft, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Konzultant diplomové práce: **Tomáš Dlabal**
Precision Castparts CZ s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Lubošovi Kroftovi, Ph.D. za odborné rady, vstřícný přístup a umožnění realizovat experimentální část této práce. Dále bych rád poděkoval panu Tomášovi Dlabalovi, který byl odborným konzultantem pro experimentální část této práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Šindelář	Jméno Ondřej		
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kroft, Ph.D.	Jméno Luboš		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Vliv tlaku chladicí kapaliny na životnost nástroje při soustružení slitin titanu			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	81	TEXTOVÁ ČÁST	52	GRAFICKÁ ČÁST	29
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Tato diplomová práce řeší vliv tlaku chladicí kapaliny na životnost obráběcího nástroje během hrubovacího soustružení titanových slitin. Cílem práce bylo otestovat nově navržený nástroj, který disponuje možností současného přívodu řezné kapaliny na čelo i hřbet kruhové vyměnitelné břitové destičky. Jedná se o unikátní technologické řešení. Nový nástroj byl porovnáván s běžně dostupným komerčním nástrojem stejné geometrie vybaveným pouze čelním přívodem řezné kapaliny. Zkoumaným a hodnoceným parametrem byla životnost nástroje, přičemž vyhodnocení životnosti bylo provedeno na základě maximálního opotřebení hřbetu. Obráběným materiálem byla titanová slitina Ti-6Al-4V. Ukázalo se, že nasazením technologie kombinovaného přívodu řezné kapaliny lze dosáhnout značeného prodloužení životnosti nástroje. V závěru jsou popsány konkrétní benefity použití této technologie včetně dosažených výsledků testování.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	soustružení, hrubování, titanové slitiny, Ti-6Al-4V, vysokotlaké chlazení, kruhová VBD, chlazení hřbetu VBD, životnost nástroje, opotřebení hřbetu

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Šindelář	Name Ondřej	
FIELD OF STUDY	Department of Machining technology		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kroft, Ph.D.	Name Luboš	
INSTITUTION	ZČU - FST – KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Effect of coolant pressure for tool life when turning titanium alloys		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	81	TEXT PART	52	GRAPHICAL PART	29
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This thesis describes the impact of pressure of coolant on the service life of cutting tool during rough turning of titanium alloys. The aim of this work was to test newly designed tool, which allows simultaneous flow of cutting liquid on the face and on the flank of a circular replaceable insert. This is a unique technological solution. The new tool was compared with a commonly available commercial tool of the same geometry equipped with only a front cut fluid supply. The examined and evaluated parameters were the tool life, which was assessed on the basis of the flank wear. The machined material was titanium alloy Ti-6Al-4V. The study shows significant expansion of tool life by used combined liquid cutting technology. Specific advantages of using this technology are described in the conclusion, including the achieved testing results.</p>
KEY WORDS	<p>turning, roughing, high-pressure cooling, titanium alloys, Ti-6Al-4V, round insert, insert flank cooling, tool life, flank wear</p>

Přehled použitých zkratk, symbolů a jednotek

CVD	chemical vapour deposition	chemické nanášení tenké vrstvy
HRSA	heat resistant super alloys	teplotně odolné superslitiny
ISO	Internat. Org. for Standardization	Mezinárodní org. pro normalizaci
MQL	minimum quantity lubrication	mikrolubrikace
PCC		Precision Castparts CZ
PVD	physical vapour deposition	nanášení tenké vrstvy odpařováním
VBD		vyměnitelná břitová destička
VB_{\max}		maximální hodnota opotřebení hřbetní části vyměnitelné břit. destičky
VB_{krit}		stanovená kritická hodnota opotřebení – maximální přípustná
a_p	[mm]	hloubka řezu
f	[mm.ot ⁻¹]	posuv na otáčku
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
MPa	megapascal	jednotka tlaku
bar	bar	jednotka tlaku
°C	stupeň Celsia	jednotka teploty
mm	milimetr	jednotka vzdálenosti
HRC	hardness Rockwell C	tvrdost dle Rockwella škálou C

Obsah

1	Analýza současného stavu.....	2
2	Využití řezné kapaliny při soustružení.....	4
2.1	Typy řezných médií.....	4
2.2	Typy přívodů řezné kapaliny do místa řezu.....	5
2.3	Tlak řezné kapaliny.....	11
3	Slitiny titanu.....	13
3.1	Slitina Ti-6Al-4V a její obrobiteľnosť.....	13
4	Současné nástrojové systémy pro hrubovací soustružení slitin titanu.....	18
5	Experimentální část.....	25
5.1	Experimentální porovnání životnosti nástrojů.....	32
5.1.1	Popis a plán experimentu.....	32
5.1.2	Očekávaný průběh experimentu.....	35
5.1.3	Vyhodnocení experimentu.....	36
5.2	Experimentální porovnání životnosti nástrojů za zvýšené řezné rychlosti.....	42
5.2.1	Popis a plán experimentu.....	42
5.2.2	Očekávaný průběh experimentu.....	44
5.2.3	Vyhodnocení experimentu.....	44

Úvod

Aktuálně se nacházíme v období, kdy lidé z průmyslové praxe zabývající se technologiemi obrábění řeší nejen otázku, zda daný materiál půjde opracovat do požadovaného tvaru a jakosti, ale také jak celý proces zajistit s co možná nejmenšími náklady. Charakteristickým rysem dnešní doby je zaměření pozornosti na snahu získávat konkurenční výhodu a celý výrobní proces řídit s co největší produktivitou. Na tento problém navazuje potřeba snižovat výrobní náklady. Jednou z nezanedbatelných položek jsou obráběcí nástroje, které jsou často hned po mzdách dělníků druhou největší nákladovou položkou výrobního segmentu.

Tato práce reaguje na aktuální problematiku související se snižováním nákladů na obráběcí nástroje, a zkoumá tak vliv tlaku a způsobu přívodu řezné kapaliny na životnost nástroje při hrubovacím soustružení titanové slitiny Ti-6Al-4V. V úvodní části práce je provedena analýza výsledků současných studií, které se zabývaly touto problematikou. Následuje popis možných způsobů přívodu řezné kapaliny, druhů řezných médií a vlivů hodnot tlaků řezného média. Pro uvedení do problematiky obrábění titanových slitin jsou popsány některé základní vlastnosti a obrobitelnost slitiny Ti-6Al-4V, na což navazuje kapitola představující v průmyslové praxi aktuálně používané nástrojové řešení pro hrubování zmíněného materiálu.

V praktické části této práce je cíleno na experimentální porovnání životnosti dvou typů nástrojů při hrubovacím podélném soustružení slitiny Ti-6Al-4V, kdy jeden z nástrojů byl navržen, a následně vyroben v Regionálním technologickém institutu Západočeské univerzity v Plzni. Nástroj druhý je volně prodejný a používán v komerční praxi. Jedná se o porovnání dvou nástrojových systémů s vyměnitelnou břitovou destičkou kruhového tvaru, kdy každý nabízí rozdílnou konstrukční variantu z hlediska přívodu řezné kapaliny. Hlavními rozdíly nově navrženého prototypového nástroje od nástroje komerčního jsou možnost chlazení břitu ze hřbetní strany vyměnitelné břitové destičky a zkrácení vzdálenosti vyústění řezné kapaliny na břit z čelní strany destičky. Celkem jsou provedeny dva typy experimentů, přičemž první hodnotí porovnání životnosti těchto dvou nástrojů za konstantních řezných podmínek, kdy proměnnými faktory jsou způsob přívodu řezné kapaliny a hodnota tlaku, druhý experiment porovnává životnost nástrojů při vyšších řezných rychlostech.

1 Analýza současného stavu

Problematikou vlivu tlaku řezné kapaliny při obrábění titanových slitin se v minulosti zabývalo již několik světových univerzit. Tato kapitola bude popisovat některé z experimentů.

První experiment se zabýval vysoce produktivním hrubováním slitiny Ti-6Al-4V (polotovár byl zbaven kůry po kování). Cílem experimentu bylo porovnat rozdíl při použití konvenčního záplavového chlazení a vysokotlakého chlazení. Vysokotlaké chlazení směřovalo tryskou nástrojového držáku na čelo VBD. Jako VBD byla použita destička bez deponované tenké vrstvy typu CNMG 120412-M1, K20. Po nastavení kritických hodnot ve formě opotřebení hřbetu a nárůstku dle ISO 3685, při jejichž dosažení je třeba test ukončit, se přistoupilo k testování za těchto podmínek:

Konstantní podmínky:

- $f = 0,2 \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$
- $a_p = 2 \text{ [mm]}$
- chladicí médium = emulze o 6% koncentraci

Víceúrovňové faktory:

- $v_c = 80, 90, 100 \text{ a } 110 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$
- $p = \text{záplavové chlazení, vysokotlaké chlazení } 70 \text{ [bar]}$

Použitím vysokotlakého chlazení při řezné rychlosti $v_c = 80 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ bylo dosaženo až dvojnásobné životnosti nástroje. Se zvyšující se řeznou rychlostí se efekt vysokotlakého chlazení na životnost nástroje postupně zmenšoval. Při hodnotě řezné rychlosti $v_c = 120 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ byla životnost nástroje při použití obou typů chlazení téměř stejná, což bylo způsobeno generováním vysokých teplot během obrábění. Při nižších rychlostech se projevila slabina záplavového chlazení, které nestíhalo ochlazovat rozhraní mezi VBD a odebíraným materiálem, což zapříčinilo vznik opotřebení hřbetu a tvorbu nárůstku. [1]

Další experiment se zabýval optimalizací řezných podmínek obrábění při soustružení slitiny Ti-6Al-4V při konvenčním a vysokotlakém způsobu chlazení. Hlavním kritériem hodnocení byl obráběcí výkon, drsnost povrchu a řezné síly. Po nalezení optimálních parametrů pro dané hodnoty tlaků se přistoupilo k testování životnosti nástroje, kdy se řezné podmínky fixovaly, ale hodnota tlaku chladicí kapaliny byla proměnným faktorem na třech úrovních.

Pro vysoký tlak byl použit nástrojový držák od spol. Seco typu jet stream PCLNR, společně s VBD typu CNMG0812. VBD byla deponována tenkou vrstvou na bázi (Ti, Al)N+TiN. Proud chladicí kapaliny byl směřován opět na čelo VBD. Tak jako u předchozího experimentu byly nastaveny kritické hodnoty ve formě opotřebení hřbetní části a nárůstku dle ISO 3685, při nichž je třeba test ukončit. Na následující straně jsou uvedeny podmínky experimentu:

Konstantní podmínky:

- $v_c = 70 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$
- $f = 0,15 \text{ [mm.ot}^{-1}\text{]}$
- $a_p = 2 \text{ [mm]}$

Víceúrovňové faktory:

- $p =$ konvenční chlazení 6 [bar], vysokotlaké chlazení 150 a 300 [bar]

Při vyhodnocování výsledků se stejně jako v předešlém experimentu ukázalo, že vysoký tlak má prokazatelný vliv na životnost nástroje. V porovnání s konvenčním chlazením (6 barů) byla životnost nástroje chlazeného tlakem 150 barů delší o 46 %, při tlaku 300 barů dokonce o 111 % delší. Navýšení životnosti u variant s vysokým tlakem je vysvětleno efektivním přívodem řezné kapaliny do rozhraní mezi nástrojem a vznikající třískou, kde dochází k chlazení a lubrikování, což napomáhá redukovat vzniklé teplo, které se v těchto slitinách velmi špatně vede. [2]

2 Využití řezné kapaliny při soustružení

Řezná kapalina (někdy také nazývaná procesní kapalinou) je prostředek, jehož základními funkcemi jsou odvádění třísek, chlazení a lubrikace v místě kontaktu mezi nástrojem a obráběným materiálem. Její správné použití umožňuje dosažení maximální produktivity, zvyšuje bezpečnost obráběcího procesu, zlepšuje funkci nástroje, výkonnost nástroje a kvalitu obráběné součásti.

Nevyhnutelným trendem dnešní doby je co nejvíce respektovat životní prostředí. Z této potřeby plyne omezování všech potenciálních odpadů, které by mohly naši planetu zatěžovat. Řezné kapaliny bezpochyby patří mezi složky, které do určité míry mohou ovlivnit kvalitu životního prostředí. Je tedy přirozenou snahou jejich množství redukovat, v některých případech dokonce zcela vyloučit. Na druhou stranu v určitých aplikacích je použití řezných kapalin zcela nezbytné. Může se jednat o potřebu dosažení předepsaných rozměrových a geometrických tolerancí, kvality obrobeneho povrchu nebo zajištění odvodu tepla z místa řezu u hůře obrobitelných materiálových skupin. Jako příklad nejproblematictějších materiálů z hlediska obrobitelnosti lze uvést žáruvzdorné niklové slitiny nebo slitiny na bázi titanu. Obrobitelnost nejběžnější titanové slitiny Ti-6Al-4V je popsána v kapitole č. 3: *Slitina Ti-6Al-4V a její obrobitelnost*, v níž je mimo jiné vysvětleno, proč je správný způsob přívodu řezného média tak důležitý.

Je-li nutné řezné kapaliny používat, měla by být oblasti využití řezných kapalin věnována dostatečná pozornost, jelikož optimalizací procesu chlazení (mazání) lze do značné míry ovlivnit hospodárnost celého procesu obrábění. Samotná chladicí média podle Statistického spolkového úřadu tvoří 8 % - 16 % nákladů na obrábění. Podíl nákladů na chladicí média je ovlivněn typem výrobku, materiálem a technologií obrábění.

Použití řezné kapaliny ovlivňují různé faktory, které jsou důležité z hlediska obráběcího procesu. Podkapitoly 1.1 - 1.3 poskytují přehled a popis těchto faktorů. [3, 4]

2.1 Typy řezných médií

Prvním faktorem je volba správného média. Existuje celá škála řezných kapalin a chladicích médií. Níže jsou uvedeny některé druhy:

Emulze

Směs minerálních olejů a vody (5–10 % oleje rozpuštěného ve vodě) nebo řešení na bázi mýdla. Používají se především, je-li požadován efekt chlazení. Emulze je nejběžnějším typem řezné kapaliny. [3, 5]

Olej

U některých strojů se místo emulze používá olej. U olejů jsou upřednostňovány mazací účinky nad chladicími. Používají se zejména tehdy, pokud je požadována vysoká kvalita obrobeneho povrchu. [3, 5]

Stlačený vzduch (DM)

Slouží k odvádění třísek, ale ve většině soustružnických operací není schopen uspokojivě odvádět teplo. V případě frézování se však jedná o mnohdy efektivnější způsob než využití řezné kapaliny, přičemž je vždy nutné uvažovat danou technologii. S ohledem na snižování nákladů třískového obrábění se v mnoha případech zavedlo obrábění za sucha. Moderní nástroje a tenké vrstvy dnes umožňují v mnoha případech obrábět za sucha nejen materiály z litiny. Stlačený vzduch s určitým chladicím účinkem se používá především při

obrábění materiálů, jako je keramika, tvrdokov nebo grafit za předpokladu vhodné frézovací technologie. Cílem přitom je co nejefektivněji a nejrychleji odstranit a odsát abrazivní prach z oblasti obrábění. [3, 5]

Mikrolubrikace (MQL)

Princip Mikrolubrikace spočívá ve využití stlačeného vzduchu s minimálním množstvím oleje zajišťujícím lubrikaci. Obrábění s chlazením MQL je z důvodu menších nákladů na energie používáno především v sériové výrobě. Poskytuje výhody ve formě snížení výloh na chladicí média včetně technologického zařízení, spotřebu energie (odpadá potřeba čerpadla) a odstranění třísek společně s jejich zpracováním. [3, 4]

Kryogenní chlazení

Jako chladicí médium je využíván kapalný plyn, čímž je maximalizován chladicí účinek. Plynem může být dusík nebo kysličník uhličitý (CO_2), přičemž v popředí je koncepce chlazení pomocí CO_2 . Je uváděn potenciální vzrůst produktivity až o 70 % a trvanlivost břitů nástroje až o 100 %. Přes výše uvedené benefity stále není zákazníka, který by tuto technologii využíval ve své sériové výrobě. Experti předpokládají velký potenciál v oblastech leteckého a energetického průmyslu, a to především u titanových slitin, martenzitických a austenitických korozivzdorných ocelí a žárovečných ocelolitin. Technologie kryogenního chlazení jsou v současné době na začátku průmyslového zavádění, nicméně uplatnění mají spíše pro kusovou výrobu součástí z výše uvedených materiálů. Řada nástrojářských společností se prozatím staví skepticky k plošnému zavádění této technologie. [3, 4]

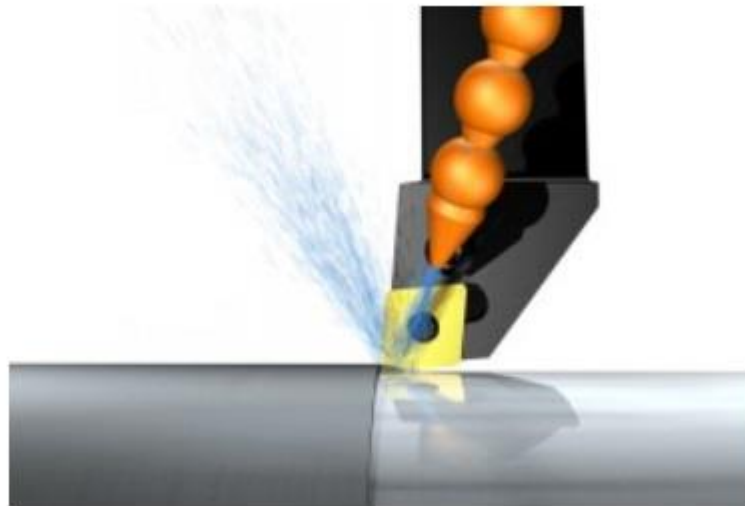
Emulze, olej a vzduch lze přivádět kanálky pro vnitřní přívod řezné kapaliny v soustružnických nástrojích. Hovoří-li se o řezné kapalině obecně, míní se tím řezná kapalina v podobě emulze nebo oleje. Použití MQL a kryogenního chlazení vyžaduje použití speciálního vybavení. [3]

2.2 Typy přívodů řezné kapaliny do místa řezu

Druhým faktorem je výstup řezné kapaliny. Moderní soustružnické nástroje jsou většinou vybaveny vnitřním přívodem řezné kapaliny tělem nástroje. Řada těchto nástrojů je konstruována tak, aby byl umožněn současný přívod řezné kapaliny na čelní i hřbetní část VBD. U nástrojů lze využít následující typy výstupů přívodu řezné kapaliny. Každý systém má své opodstatnění a výhody. [3]

Konvenční přívod

Pro konvenční výstup přívodu řezné kapaliny se používají (jak je vidět na obr. 1) například stavitelné trysky, které ve většině případů mají větší výstupní průměr než trysky přesného přívodu řezné kapaliny. Během obrábění má být zajištěno, aby řezná kapalina ve velkém množství proudila přes břitovou destičku a obrobek (může být označováno jako záplavové chlazení). Používané nástroje nejsou uzpůsobeny pro vysoké tlaky řezné kapaliny. Negativním jevem při použití konvenčního chlazení je to, že se část chladicí kapaliny přemění v páru, která následně brání přístupu nové kapaliny, a tak není zaručen potřebný chladicí a mazací účinek. Mezi další nevýhody patří energetická náročnost spojená se zásobováním stroje chladicím médiem, úpravou a jeho likvidací. To může představovat problém z hlediska dodržování evropské směrnice o šetření energií. Také pouze malé procento kapaliny se při záplavě dostane do místa řezu, ač je zde jeho přítomnost klíčová.



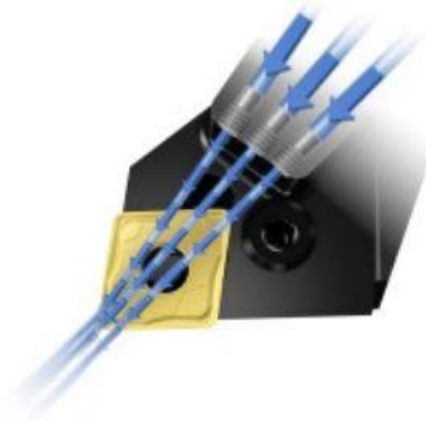
Obrázek 1 - konvenční přívod řezné kapaliny pomocí stavitelné trysky [6]

Navzdory výše zmíněným nevýhodám se stále jedná o nejběžnější a mnohdy plně dostačující způsob chlazení při obrábění, a to především díky své jednoduchosti, která neklade žádné zvláštní nároky na stroj a nástroj. V mnoha případech se tak může jednat o ekonomicky nejvýhodnější variantu. Číselný odhad pro výkonné obrábění činí u záplavového chlazení přibližně 60 %. Na vysokém procentu se podílí především celá Asie a Jižní Amerika, kde konvenční způsob chlazení stále dominuje. [3,4]

Přívod řezné kapaliny z horní strany

Přesný přívod řezné kapaliny neboli přesný přívod řezné kapaliny z horní strany usměrňuje proud řezné kapaliny tryskou přímo do místa řezu na čelní straně břitu. Tento typ přívodu řezné kapaliny snižuje teplotu generovanou při řezání, do jisté míry omezuje tvorbu nárůstku a zlepšuje kontrolu utváření třísek. Lze jej použít pro vysoké tlaky řezné kapaliny a dosáhnout tak zlepšení dělení třísek.

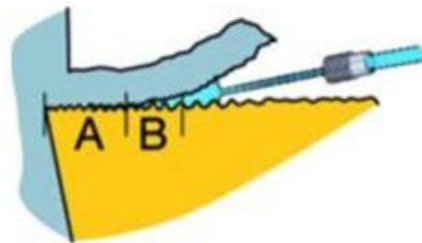
Moderní soustružnické nástroje jsou na čelní straně břitu opatřené tryskami zajišťujícími přesný přívod řezné kapaliny přímo do místa řezu (viz obr. 2), což pomáhá kontrolovat dělení třísek a zaručuje bezpečnost obrábění. Pro optimalizaci výkonu stroje, další zvýšení životnosti nástrojů a zlepšení utváření třísek lze využít jemné nastavení dodávaného množství a rychlosti průtoku řezné kapaliny prostřednictvím změny průměru trysky.



Obrázek 2 – přesný přívod řezné kapaliny na čelo VBD [6]

Velmi příznivého účinku je dosaženo při vysokotlakém přesném přívodu řezné kapaliny. Vzniká tak hydraulický klín (viz obr. 3), ve kterém má proud řezné kapaliny 3 hlavní účinky:

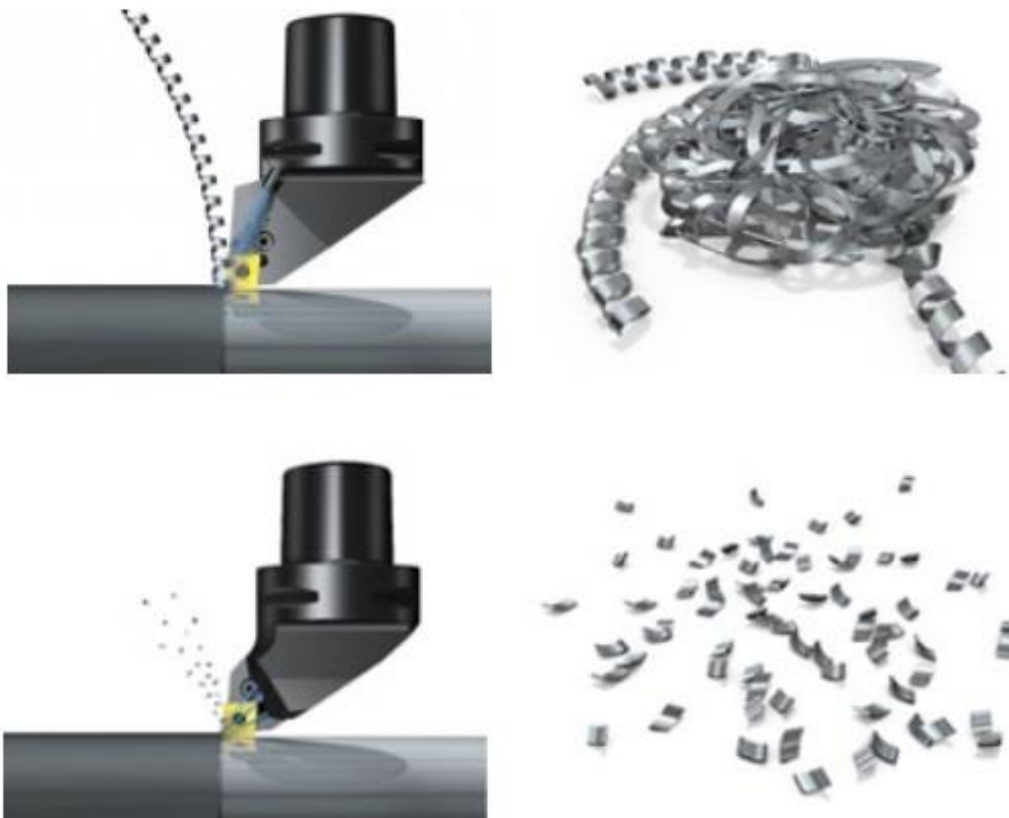
- v oblasti kontaktu (oblast A) obráběného materiálu s VBD je zajištěno účinnější chlazení VBD
- dochází k rychlému vytlačení třísek z povrchu VBD, což vede ke snížení jejího opotřebení
- usnadňuje dělení třísek na menší kousky a jejich odplavení z oblasti řezu



Obrázek 3 – přesný vysokotlaký přívod vytvářející hydraulický klín [3]

Příznivý účinek přesného přívodu řezné kapaliny je patrný už při nízkých tlacích řezné kapaliny, ale čím vyšší její tlak je, tím problematičtější materiály je možné úspěšně obrobit. Pro efektivní obrábění titanových slitin je vysokotlaký systém přívodu řezné kapaliny v podstatě nezbytný.

Na obr. 4 jsou vidět dva různé přístupy chlazení čela VBD. Horní snímek zachycuje způsob, kdy proud řezného média tryská do místa řezu z velké vzdálenosti. Proud kapaliny se tak nedostává efektivně mezi kontaktní zónu břítu a vznikající třísky. Naopak dolní snímek demonstruje efekt přímého směřování proudu řezné kapaliny do místa řezu (na čelo nástroje) na tvorbu třísky. [3, 4]



Obrázek 4 – různé způsoby vyústění řezné kapaliny na čelní část VBD [6]

Přívod řezné kapaliny ze spodní strany

Proud řezné kapaliny působící na hřbetní stranu břítu efektivně odvádí teplo z břitové destičky, což přináší prodloužení její životnosti a umožňuje lépe předvídat proces obrábění. Tato technologie umožňuje zvýšení řezné rychlosti a posuvu, čímž lze dosáhnout větší výkonnosti. [3]

Přívod řezné kapaliny z horní i spodní strany

Při některých soustružnických operacích je výhodné využít současný přívod řezné kapaliny oběma výše zmíněnými způsoby, viz obr. 5. Jako vždy je to otázka obráběného materiálu, typu operace, použité nástrojové třídy a zvolených řezných podmínek. Dochází tak ke kombinaci výhod poskytovaných oběma variantami (odvod a lámání třísky, redukce tvorby nárůstku, redukce teploty řezu, zpomalování opotřebování atd.) Kombinovaný způsob přívodu řezné kapaliny je výhodné použít pro určitou oblast hloubky řezu a posuvu, která je u každého obráběného materiálu individuální.

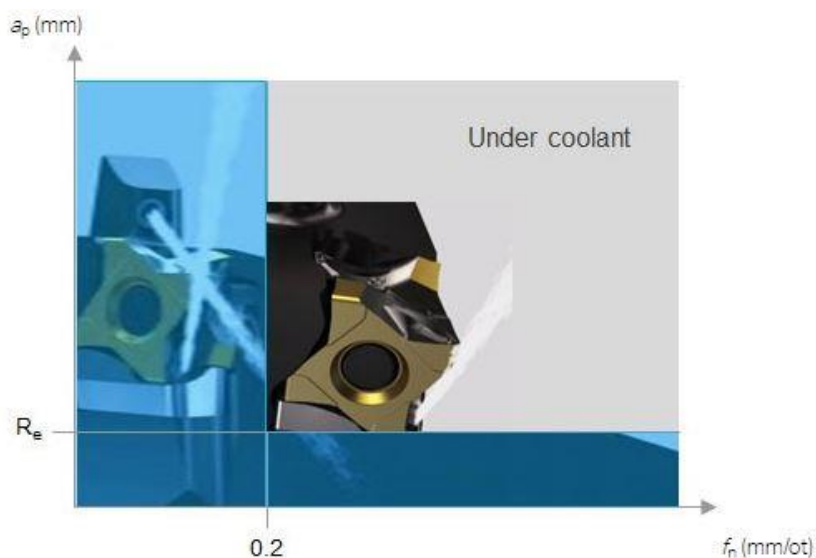


Obrázek 5 – kombinovaný přívod řezné kapaliny [3]

Na obr. 6 je uveden příklad v současnosti nejvhodnější technologie přívodu řezné kapaliny při soustružení ocelí v závislosti na nastavených řezných podmínkách (a_p a f). Kombinovaný způsob přívodu je uvažován pro modrou oblast řezných podmínek, pro šedou pak pouze přívod na hřbet. Proud řezné kapaliny dopadající na čelní plochu nástroje by v šedé oblasti mohl způsobit, že by docházelo ke snížení opotřebování řezné hrany, ale zároveň by se zvýšilo opotřebování ve tvaru žlábků. Stanovení velikosti opotřebování žlábků může být obtížné, což by vedlo k nepředvídatelné a zkrácené životnosti nástrojů.

Velmi vhodným příkladem použití může být obrábění niklových a titanových slitin, kde je často používán nástroj s deponovanou tenkou vrstvou metodou PVD. Vyměnitelná břitová destička je tímto způsobem chráněna před působením tepla, a lze předcházet její nežádoucí plastické deformaci.

Nástrojovým třídám s tlustým povlakem, jako jsou CVD nástrojové třídy sloužící jako první volba pro obrábění materiálů ISO P a ISO K, poskytuje dobrou ochranu proti působení tepla jejich povlak. Při jejich použití pro hrubovací až střední obrábění mohou tyto nástrojové třídy dosahovat nejlepší životnosti s pouhým přívodem řezné kapaliny ze spodní strany. [3]



Obrázek 6 – oblasti reprezentující vhodný způsob přívodu řez. kapaliny na základ. hloubky řezu a posuvu [3]

Na obr. 7 je uvedena tabulka představující jednotlivé výhody přívodu řezné kapaliny z horní a ze spodní strany při obrábění různých typů materiálů různými řeznými nástroji. Z obr. 7 je patrné, že přívod řezné kapaliny na hřbet VBD (zdola) má obecně největší vliv na životnost nástroje. Při přívodu řezné kapaliny na čelo VBD (shora) dochází primárně k lepšímu lámání třísky, ale v některých případech i k prodloužení životnosti nástroje. Je třeba zmínit, že uvedenou tabulku je nutné brát pouze jako orientační, jelikož neuvažuje například řeznou geometrii nástroje a typ prováděné operace. [3]

Obráběný materiál	Typ nástrojové třídy	Přívod řezné kapaliny shora	Přívod řezné kapaliny zdola
P	CVD	Kontrola utváření třísek	Životnost nástroje
	PVD	Kontrola třísky / Životnost	
M	CVD	Kontrola utváření třísek	
	PVD	Kontrola třísky / Životnost	
K	CVD	Životnost nástroje	
	Keramika	Životnost nástroje	
N	Nepovlakovaná	Kontrola třísky / Životnost	
	PVD	Kontrola třísky / Životnost	
	PCD (diamant)	Kontrola třísky / Životnost	
S	PVD	Kontrola třísky / Životnost	
	Keramika	Kontrola utváření třísek	

Obrázek 7 - výhody přívodu řezné kapaliny z horní a ze spodní strany při obrábění různých typů mat. [3]

Jak je patrné z výše uvedených popisů jednotlivých způsobů přívodů řezné kapaliny, správně zvoleným způsobem lze proces obrábění velmi zefektivnit, naopak špatně zvolenou technologií může být i na první pohled vyspělejší konstrukce výrazně kontraproduktivní. Kromě technických kritérií (dodržení požadavků na obrobek dle zákazníka) je třeba zvažovat kritéria ekonomická. Použití přesný a vysokotlaký přívod musí mít své opodstatnění, jako je tomu například u obrábění žáruvzdorných slitin (HRSA) a slitin titanu vzhledem k jejich vlastnostem (vlastnosti a obrobitelnost titanové slitiny Ti-6Al-4V jsou uvedeny v kapitole č. 3: *Slitina Ti-6Al-4V a její obrobitelnost*). Neopodstatněné používání s sebou nese vysoké pořizovací náklady, což se neblaze promítne v hospodaření společnosti.

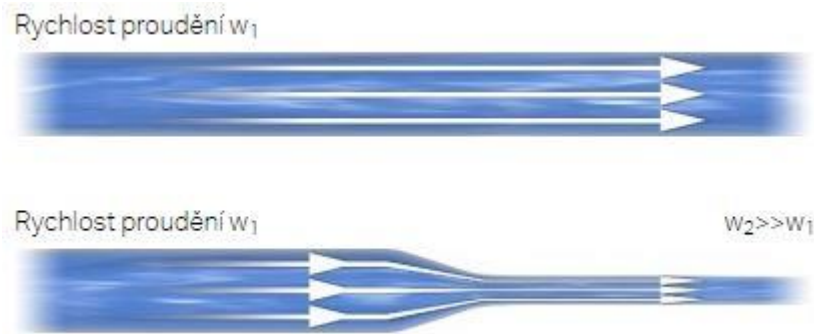
2.3 Tlak řezné kapaliny

Tlak řezné kapaliny společně s technologií jejího výstupu tvoří nejpodstatnější faktory ovlivňující účinnost řezné kapaliny při procesu obrábění. Řezná kapalina může tryskat do místa řezu běžným tlakem o hodnotě 7-10 barů nebo také v hodnotách 70-150 barů. V druhém případě hovoříme o vysokotlakém chlazení, které je v současné době velmi diskutovaným tématem průmyslové praxe. Tato podkapitola bude popisovat právě vysokotlaké chlazení.

Většina strojů je v dnešní době připravena pro vysokotlaké chlazení s hodnotou tlaků kolem 70-80 barů. Pro některé náročné aplikace se využívá strojní vybavení umožňující se hodnotami tlaků pohybovat až kolem 150 barů.

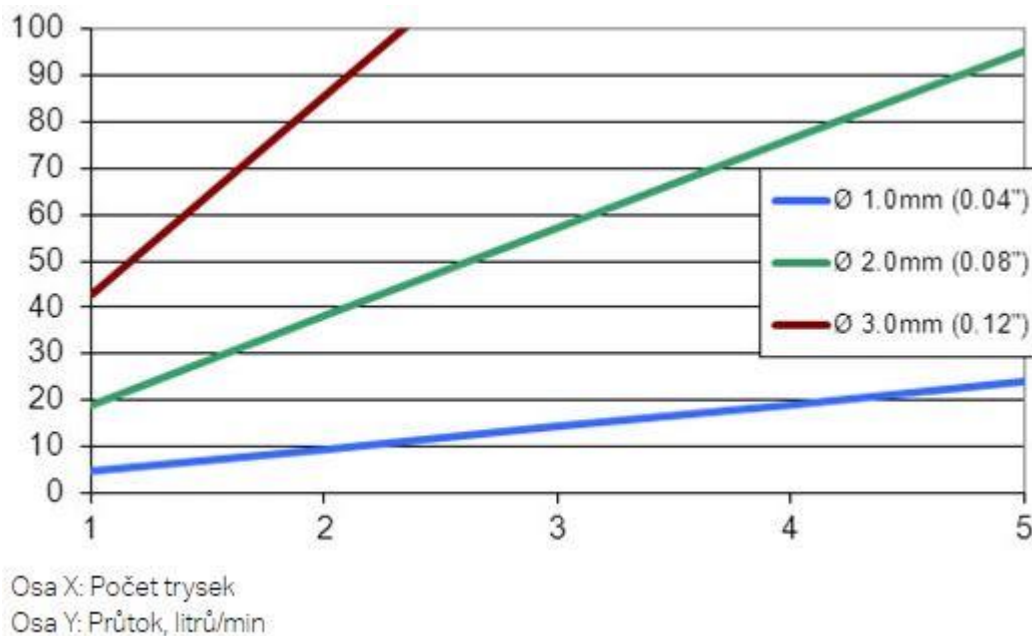
Pro maximální využití potenciálu vysokotlakého chlazení je třeba využívat pouze nástrojové systémy, které svou konstrukcí umožňují přesně zacílit proud řezné kapaliny do místa řezu. Strojní a nástrojové vybavení umožňující tento způsob chlazení s sebou přináší vyšší pořizovací náklady oproti konvenčním způsobům chlazení, na což musí být brán zřetel při zvažování investice. Úspory na nástrojích vlivem prodloužení jejich životnosti za pomoci těchto systémů musí být větší než náklady do těchto systémů.

Potřebnou hodnotu tlaku výstupu řezné kapaliny určují parametry konstrukce přívodní trysky, obráběného materiálu, hloubky řezu a posuvu. Požadovaný průtok řezné kapaliny závisí na tlaku a celkovém průřezu kanálků pro přívod řezné kapaliny. Jak je vidět na obr. 8, je-li snížen průřez kanálku, kterým je přiváděna řezná kapalina, vzrůstá rychlost jejího proudění a současně se při daném tlaku snižuje průtočné množství. Správným dimenzováním trysek lze docílit přesného laminárního proudu. To je proudění vazké kapaliny (ideální nestlačitelná kapalina s vnitřním třením), při kterém se proudnice nemísí a jsou vzájemně rovnoběžné. [6]



Obrázek 8 – vliv snížení průřezu kanálku na rychlost proudění kapaliny [6]

Na obr. 9 je znázorněno, jaký vliv má změna průřezu trysky na průtokové množství řezné kapaliny za předpokladu konstantního tlaku 80 barů. Na základě toho lze uvést tvrzení, že konstrukce trysky významně ovlivňuje energetickou náročnost procesu chlazení.



Obrázek 9 – porovnání závislosti počtu a průměru trysek na průtokovém množství média [6]

Pro technické zajištění vysokotlakého přívodu řezné kapaliny je nezbytné, aby čerpadlo kapaliny splnilo požadavky na tlak a průtok. Řezné parametry společně s obráběným materiálem jsou hlavním vodítkem pro nastavení správného tlaku chlazení. Při většině aplikací je dostatečných 80 barů, ale v případě materiálů s obtížně dělitelnou třískou, což jsou např. slitiny titanu, Inconelu nebo superduplexní oceli, je výhodné využít vyšších tlaků až kolem 150 barů. Požadavky na průtok vyplývají z počtu a průměru výstupů řezné kapaliny. [6]

3 Slitiny titanu

V současné době je známo více než 100 titanových slitin, ale komerčně využívané množství slitin čítá rozmezí pouze 20 – 30. Modifikace krystalografické mřížky přiřazuje jednotlivé slitiny do kategorií alfa, beta a alfa-beta. V případě čistého titanu je struktura alfa, jejíž mřížka je šesterečná, těsně uspořádaná (HCP), stabilní při pokojové teplotě. Prvky jako hliník, cín a zirkon zvyšují odolnost fáze alfa proti deformaci tečením. Malé množství molybdenu a niklu zvyšuje korozní odolnost. Při určité kombinaci vanadu a chromu může být při pokojové teplotě stabilní fáze beta, případně alfa-beta. Slitiny fáze alfa nejsou vhodné pro tepelné zpracování. Zpevňování u této slitiny je vyvoláno tuhým roztokem. Transformace α struktury na β strukturu probíhá při 880 °C. Atomy fáze beta uspořádává prostorově středěná kubická mřížka (BCC). Stejně tak jako u ocelí dochází u některých slitin titanu k martenzitické přeměně po zakalení. Její vliv je však mnohem méně významný, než je tomu u ocelí. Pro zvyšování pevnosti fází beta a alfa-beta má praktický význam především precipitační vytvrzování. Titan dovede odolávat agresivnímu prostředí, které u běžných konstrukčních materiálů způsobuje napadení korozi. Toto je zapříčiněno vrstvičkou TiO₂ o tloušťce přibližně 0,01 mm chránící povrch titanu. Dojde-li k narušení vrstvy a kyslík má k materiálu přístup, vrstva je okamžitě obnovena. [7]

3.1 Slitina Ti-6Al-4V a její obrobiteľnosť

Pokud by měla být jmenována vůbec nejrozšířenější a komerčně nejvyužívanější titanová slitina, byla by to právě slitina Ti-6Al-4V. Její celkové zastoupení ve spektru přibližně třiceti známých titanových slitin je odhadováno na 70 %. Jedná se o slitinu s krystalografickou modifikací α - β (ještě existují čistě α a β slitiny). Obecně platí, že obrobiteľnosť se směrem od α slitin k β slitinám zhoršuje. Tato slitina je vzhledem ke svým excelentním mechanickým vlastnostem (budou uvedeny níže) relativně dobře obrobiteľná. Dalším faktorem, který zásadně ovlivňuje její hojné rozšíření v průmyslovém světě, je její měrná hmotnosť, z čehož plynou i oblasti použití jako je letecký a kosmický průmysl, energetický průmysl, automotive, ale třeba i lékařství vzhledem k jejím biokompatibilním vlastnostem. Ve výše zmíněných průmyslových oblastech jsou součástí z této slitiny vystavovány extrémním podmínkám v podobě vysoké zátěže při teplotách, při nichž by ostatní materiály selhávaly.

Slitina je nejčastěji používána v měkkém stavu s teplotou rekrytalizačního žíhání 700-800 °C, které trvá přibližně 1–8 hodin. Obecně je doporučeno po žíhání slitinu chladit do teploty 550 °C. Použitelnost slitiny je limitována do 450 °C, kdy materiál ještě neztrácí své mechanické vlastnosti. Kalení při teplotě 850–950 °C a stárnutí při teplotě 480–510 °C jsou způsoby tepelného zpracování, kterými lze zvýšit pevnostní vlastnosti. [7]

Hlavní benefity Ti-6Al-4V lze shrnout v následujících bodech:

- excelentní mechanické vlastnosti (viz tabulka 2),
- nízká měrná hmotnost,
- odolnost vůči korozi (vznik odolné cca 0,01 mm tenké vrstvy TiO₂ pokrývající povrch součásti - při narušení je okamžitě obnovena, je-li povrch součásti přístupný kyslíku),
- nízká tažnost,
- dobrá svařitelnost,
- biokompatibilita (téměř všechny implantáty z této slitiny)

V tabulce 1 je uvedeno chemické složení Ti-6Al-4V, v tabulce 2 pak její mechanické vlastnosti.

Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V	
prvek	obsah prvku [%]
hliník	5,5 - 6,75
vanad	3,5 - 4,5
uhlík	0,1
železo	0,3
kyslík	0,2
dušík	0,05
vodík	0,02
titan	zbytek

Tabulka 1 – chemické složení slitiny Ti-6Al-4V [7]

Mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V	
vlastnost	hodnota
mez kluzu (Rp 0,2)	758 [MPa]
mez pevnosti	860 [MPa]
tažnost	> 8 %
únavová pevnost při zatížení 600 MPa – po lisování za tepla	> 10 000 000 cyklů
tvrdost dle Rockwella	33 HRC
modul elasticity	120 GPa

Tabulka 2 – mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [7]

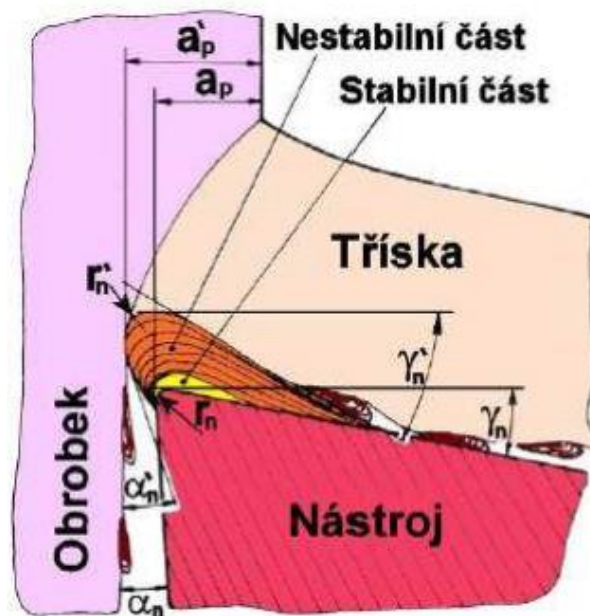
Vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V komplikující obráběcí proces

Vlastnosti Ti-6Al-4V (obecně platné pro obrábění titanových slitin) komplikující proces obrábění uvádějí následující body:

- přibližně poloviční hodnota modulu pružnosti oproti ocelím – částečné zpevňování povrchových vrstev (není-li zajištěna dostatečná tuhost soustavy stroje – nástroj – obrobek, hrozí zborcení tenkostěnných obrobků či nedodržení předepsané drsnosti povrchu),
- vysoké řezné síly - vzhledem k zachovávání si pevnostních vlastností za vysokých teplot,
- síly jsou soustředěny do těsné blízkosti břitu nástroje - styk vysoce abrazivních třísek s čelem břitu nástroje,
- velmi špatná tepelná vodivost - zapříčiňuje soustředění tepla vzniklého při řezání z největší části do nástroje,
- vysoké hodnoty řezné rychlosti mohou zapříčinit chemickou reakci mezi řezným nástrojem a třískou - může dojít k vylomení ostří nebo celkovému lomu VBD [7]

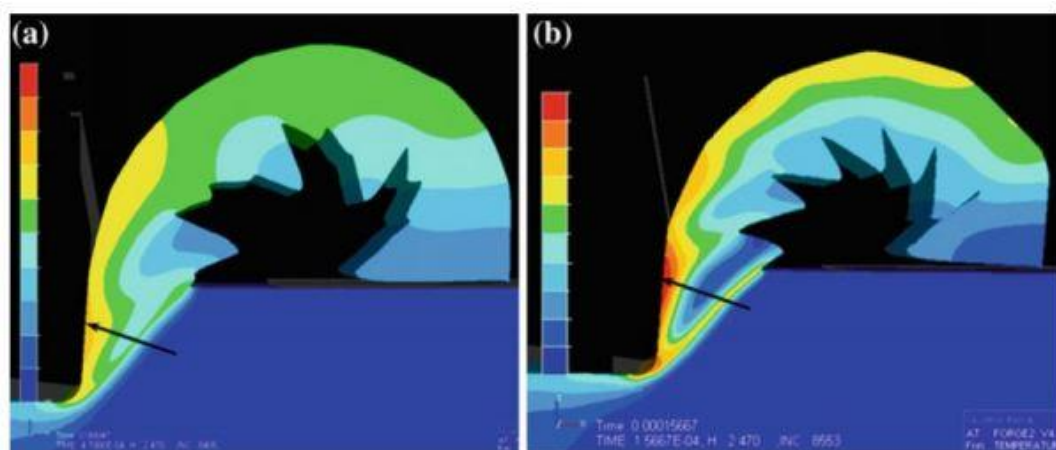
Teplota a plastické deformace při obrábění titanových slitin

Jak bylo uvedeno ve výčtu vlastností komplikujících obrobitelnost této slitiny, špatné vedení tepla materiálem se značným způsobem podílí na snižování životnosti nástroje. V porovnání s obráběním ocelí je hodnota teploty na nástroji až čtyřikrát větší (přes 1200 °C). Nejvyšších teplot je dosaženo v oblasti sekundární plastické deformace čili v místě tření třísky s čelem břitu nástroje (vysoký tlak, teplota, adheze). Sekundární plastickou deformaci lze jinak nazvat plastickou deformací přilehlé vrstvy třísky. V třisce postupně dochází ke vzniku váznoucí vrstvy na břitu nástroje, z níž se může vytvořit poměrně stabilní nárůstek. Materiál stabilního nárůstku je vysoce zpevněn (pevnost, tvrdost) vlivem velké plastické deformace a dovede odolávat i působící třisce. Na stabilním nárůstku se postupně vytváří nárůstek nestabilní viz obr. 10, který má tendenci se odtrhávat (může dojít ke společnému odtržení s nárůstkem stabilním). Odtržená část odchází po čele břitu společně s třískou a po hřbetě pod nástrojem. Tento jev způsobí vyštipování řezné hrany a rozkmitání soustavy, což přispívá k rychlejšímu opotřebení nástroje. V závislosti na fázi obrábění (hrubování, dokončování) může mít stabilní část nárůstku i pozitivní vliv na trvanlivost nástroje. Zatímco u dokončovacího soustružení je vznik stabilního i nestabilního nárůstku nevhodný, v případě hrubování, kde nezáleží tolik na kvalitě povrchu, tomu tak být nemusí. Při hrubování nárůstek vytvoří novou geometrii chránící břit nástroje, což může prodloužit jeho životnost. [8,9]



Obrázek 10 – mechanismus tvorby nárůstku [8]

Pokud teplota v místě řezání překročí teplotu fázových přeměn v obráběném materiálu, může to vést ke strukturálním přeměnám a fázovým transformacím v tříске. Na obr. 11 je vidět rozložení tepla v segmentované tříске při různých řezných rychlostech (a – 60 [m.min⁻¹], b – 180 [m.min⁻¹]). Při tvorbě segmentu jsou jednotlivé složky řezné síly F_c a F_f zvyšovány. Tvorba trhlin prudce klesá v momentě začátku smyku třísky, přičemž vytváření smykového pásma spojeného se vznikem segmentové třísky je doprovázeno nárůstem teploty v řezné zóně.

Obrázek 11 – rozklad tepla v různých částech segmentové třísky a) $v_c = 60$ [m.min⁻¹], b) $v_c = 180$ [m.min⁻¹] [9]

Častým jevem v počáteční fázi obrábění je nalepování tenké vrstvy materiálu na čelo nástroje. Tenká vrstva zprvu chrání břit před otěrem, ale v dalším průběhu obrábění má tendenci se odlepovat a odtrhávat kousky materiálu na ostří řezného nástroje, což může vést až k vyštípnutí ostří.

Vhodnou volbou typu nástroje, řezných podmínek a řezného prostředí lze nežádoucí jevy redukovat na přijatelnou úroveň. V kapitole č. 4 *Současné nástrojové systémy pro hrubovací soustružení titanu* je popsána varianta nástroje využívající kruhovou VBD, která z hlediska rozkladu tepla představuje neoptimálnější variantu. [8,9]

Obecná doporučení pro soustružení titanových slitin

Pro efektivní obrábění titanu za předpokladu maximální životnosti nástroje se obecně doporučuje dodržovat několik pravidel:

- nízká řezná rychlost (generuje menší teploty vznikající při obrábění),
- nepřerušovat řez,
- vysoké hodnoty posuvu (ovlivňuje méně teplotu než řezná rychlost) a hloubky řezu,
- použití chlazení – vysokotlaké chlazení s přesným směřováním (jeho výhody popsány v kapitole č. 2 *Využití řezné kapaliny při soustružení*),
- použití základní geometrie – velký radius a úhel špičky je výhodný, protože rozloží řezné síly a teploty do větší plochy VBD, což zamezí lokálnímu poškození VBD,
- tuhé upnutí obrobku – tuhé nástroje,
- hladká řezná geometrie, velký pozitivní úhel čela, zesílené ostré hrany,
- použití karbidových VBD velkých rozměrů, aby docházelo k dostatečnému absorbování tepla. [7]

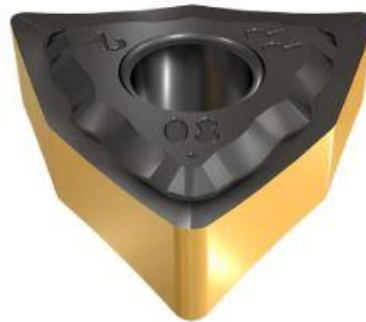
4 Současné nástrojové systémy pro hrubovací soustružení slitin titanu

Tato kapitola bude popisovat některé z doporučených nástrojových variant pro hrubovací soustružení od předních výrobců nástrojů, včetně detailnějšího popisu nástroje od společnosti Sandvik Coromat ve spojení s kruhovou VBD od společnosti Iscar, který je v současné době využíván ve společnosti Precision Castparts CZ s.r.o. (dále jen PCC). Detailněji popsany nástroj je jedním ze dvou nástrojů, u nichž byla testována životnost v praktické části této práce.

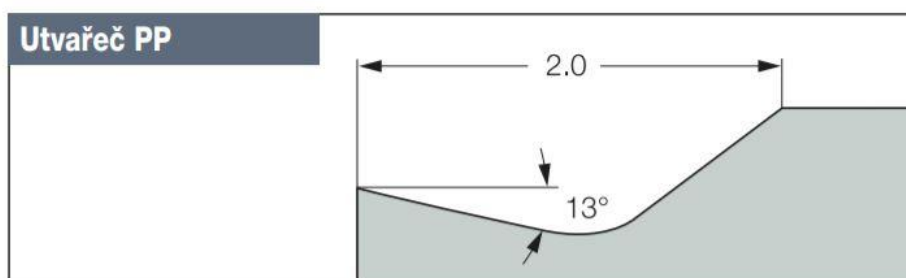
Jako referenční operace při výběru nástroje je vybráno podélné hrubovací soustružení slitiny Ti-6Al-4V. Doporučované nástroje jsou koncipovány pro typově stejný druh obrábění, jako tomu je u aktuálně používaného nástroje od spol. Sandvik Coromat, a zároveň jde o výchozí typ operace prováděné v rámci experimentálního porovnávání životnosti dvou nástrojů (operace a její podmínky jsou detailně popsány v praktické části této práce).

Iscar

Společnost Iscar nabízí několik možných variant držáků, jejichž společným prvkem je oboustranná trigonová VBD typu WNMG 080412 – PP (viz obr. 12) s utvařečem třísek s velmi pozitivním úhlem čela, ostrou a radiálně pozitivní řeznou hranou. Geometrie utvařeče je znázorněna na obr. 13. VBD je ze slinutého jemnozrnného karbidu třídy IC20 bez deponované tenké vrstvy. [10]

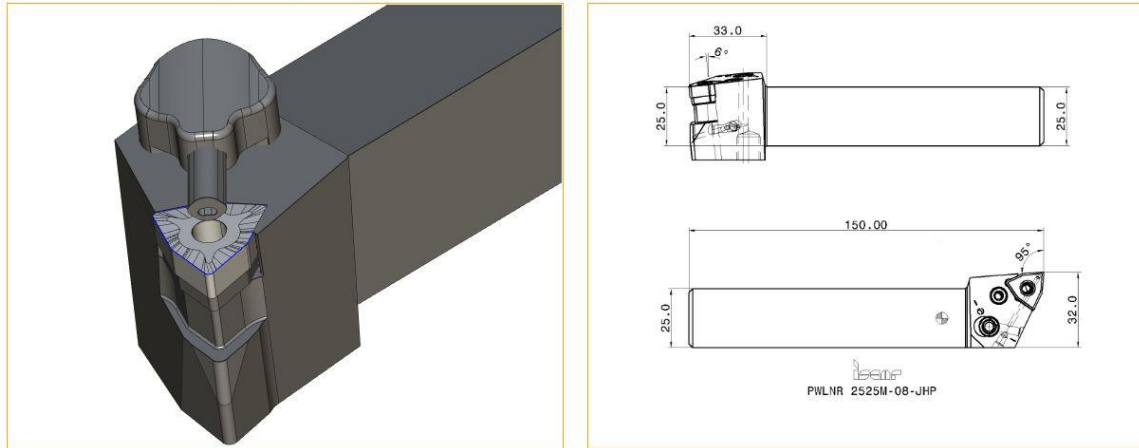


Obrázek 12 – VBD typu WNMG 080412 – PP [11]



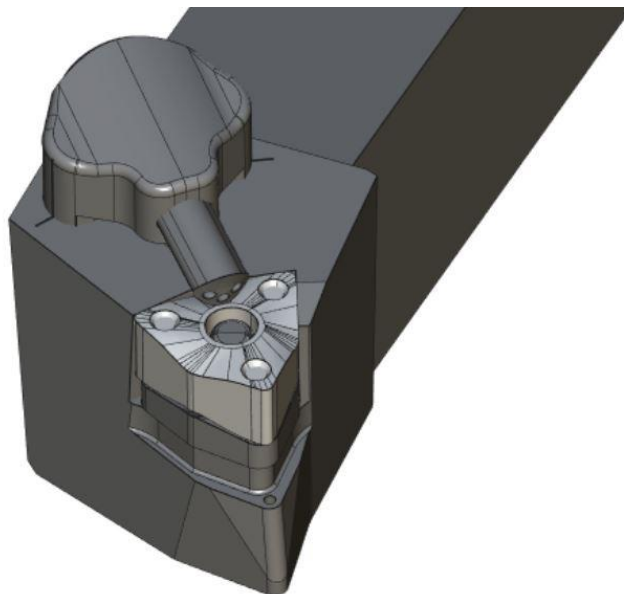
Obrázek 13 – pozitivní geometrie utvařeče třísek označená jako PP [12]

Na obr. 14 je uveden příklad doporučeného držáku typu PWLNR 2525M-08-JHP. Systém přívodu řezné kapaliny je řešen vnitřkem nástroje a vystupuje z trysky na čelní stranu hřbetu. Maximální hodnota tlaku je uvedena na 300 [bar], jedná se tak o nástroj koncipovaný pro vysokotlaké chlazení. [13]



Obrázek 14 – držák PWLNR 2525M-08-JHP uzpůsobený pro vysokotlaký přívod řezné kapaliny na čelo VBD [13]

Naproti tomu další z doporučených držáků typu PWLNR 2525X-08X-JHP-MC nabízí možnost současného přívodu řezné kapaliny na čelní i hřbetní stranu VBD. Taktéž jde o koncept vysokotlakého chlazení o limitní hodnotě 300 [bar]. Jak bylo uvedeno v podkapitole 2.2. *Typy přívodů řezné kapaliny do místa řezu*, tento způsob přívodu řezné kapaliny by teoreticky měl prodloužit životnost nástroje. Na obr. 15 je vidět provedení výstupu řezné kapaliny pro směřování proudu na hřbet VBD. [14]



Obrázek 15 – držák PWLNR 2525X-08X-JHP-MC uzpůsobený pro kombinovaný přívod řezné kapaliny na VBD [14]

Walter

Nabízené varianty nástrojových držáků mají opět společný prvek, kterým je VBD čtvercového tvaru typu SNMG190616-NRT WS10 znázorněná na obr. 16. Značení NRT představuje makrogeometrii z řady Walter Sky.Tec™ vhodnou pro hrubování Ti-6Al-4V, která má podle výrobce zajistit prevenci opotřebení utvařeče třisek. WS10 značí třídu slinutého karbidu, která je i v tomto případě bez deponované tenké vrstvy. [15,16]



Obrázek 16 – VBD typu SNMG190616-NRT WS10 [16]

Nabízený neutrální držák C6-DSDNN-00070-19 s úhlem nastavení 45° je znázorněný níže na obr. č. 17. Úhel sklonu ostří (λ_s) je -6° , ortogonální úhel čela (γ) je -6° . Přívod řezné kapaliny je realizován vnitřkem nástroje a směřuje na čelo VBD, avšak vzdálenost mezi výstupem a řeznou částí je značně delší oproti nabízenému řešení od spol. Iscar. Navíc zde chybí u dalších nabízených variant řešení umožňující současný přívod řezné kapaliny na čelo i hřbet VBD. [17]



Obrázek 17 - držák typu C6-DSDNN-00070-19 [17]

Sandvik Coromat

Tato část se bude věnovat detailnějšímu popisu nástrojového systému (držák + VBD) od společnosti Sandvik Coromat, jenž bude jedním ze dvou testovaných nástrojů v praktické části této práce. Zároveň jde o současně používanou technologii ve spolčenosti PCC.

Nástroj má označení C5 SRDCN-12HPA. Jedná se o soustružnický neutrální nůž s možností vysokotlakého přívodu řezné kapaliny (označení HPA). Z obr. 18 je patrné, že vývod řezné kapaliny nástroje je konstruován pomocí třech válcových otvorů v těle nástroje směřujících proud řezné kapaliny na břit, potažmo čelo nástroje. Vzhledem k značné vzdálenosti trysek je přesné směřování řezné kapaliny celkem komplikované, navíc je směr proudění dán fixně (nelze změnit orientaci výstupu řezné kapaliny) nehledě na typ operace. Chybí zde možnost chlazení na hřbet nástroje.



Obrázek 18 – používaný nástroj ve spol. PCC typu C5 SRDCN-12HPA od společnosti Sandvik [18]

Značení nože je v souladu s ISO standardy. Popis významu jednotlivých písmen ve značení nástroje je vysvětlen níže a na obr. 19

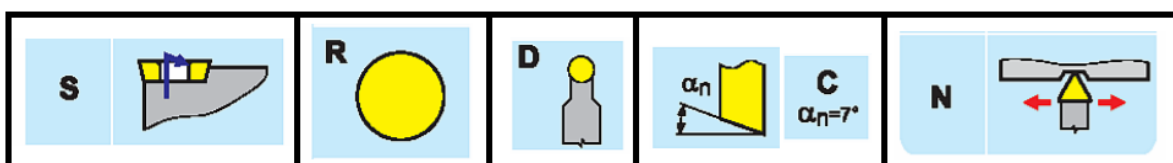
S - upnutí VBD středovým šroubem

R - kruhová VBD

D - tvar nože a úhel nastavení (u kruhové VBD se úhel nastavení mění v závislosti na hl. řezu)

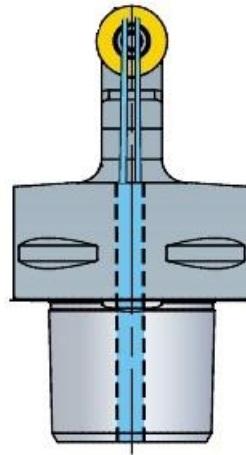
C - úhel hřbetu = 7°

N - směr řezu může být v obou směrech



Obrázek 19 – význam jednotlivých písmen ve značení nástroje [19]

Na obr. 19 je schematicky zobrazen způsob vedení řezné kapaliny vnitřkem nástroje. Výrobce předepisuje maximální hodnotu tlaku 150 barů.



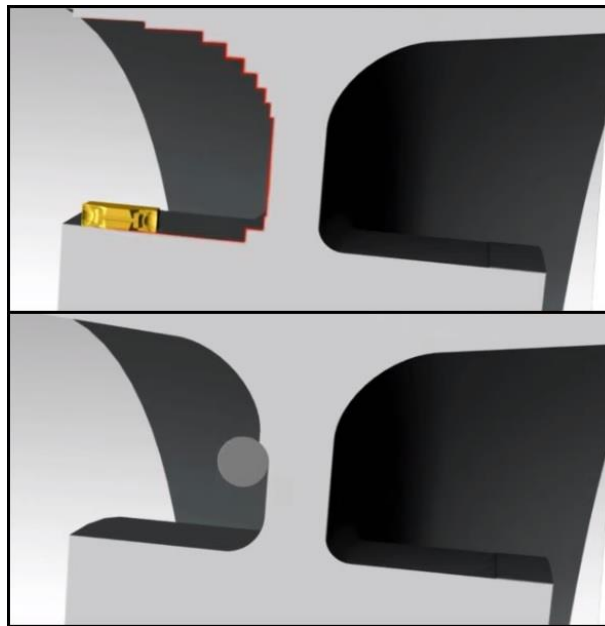
Obrázek 20 – znázornění přívodu řezné kapaliny vnitřkem nástroje [18]

Benefity vyplývající z použití přesně směřovaného proudu řezné kapaliny o vysokém tlaku byly popsány v podkapitolách 2.2 *Typy přívodu řezné kapaliny do místa řezu* a 2.3 *Tlak řezné kapaliny*. Pro obrábění titanových slitin je správně nastavený systém chlazení vzhledem k velmi špatné tepelné vodivosti těchto slitin zcela zásadní.

Je vhodné si položit otázku, proč pro tyto aplikace použít kruhovou VBD. Níže jsou uvedeny její výhody:

- kruhový tvar je výhodný především z hlediska pevnosti, která je dána vysokým poloměrem,
- symetrický tvar umožňuje rovnoměrnější rozložení tepla (velké množství tepla absorbuje nástroj),
- možnost měnění řezné hrany po obvodu celé VBD v závislosti na opotřebením a záběrových podmínkách, a to bez nutnosti demontáže a zpětné montáže VBD do lůžka nože (stačí pouze povolit středový šroub a VBD pootočit dle potřeby),
- využití při profilování kapsových tvarů (např. součásti do leteckých motorů) – možnost trochoidního soustružení (pojem trochoidní soustružení je vysvětlen níže)

Obr. 21 zobrazuje výrobu kapsového tvaru dvěma odlišnými způsoby.



Obrázek 21 – konvenční (nahore) a trochoidní (dole) metoda soustružení [20]

Horní snímek zobrazuje konvenční metodu, kdy je použita VBD pro drážkování. Nevýhodou této metody je:

- generování vysokých a nepravidelných řezných sil,
- tendence ke vzniku vibrací,
- špatná tvorba třísky,
- zbytkové napětí v obráběném materiálu

Naproti tomu dolní snímek představuje metodu trochoidního soustružení, pro nějž platí:

- vysoké hodnoty posuvu, nízké hloubky řezu – mění se v průběhu obrábění v závislosti na dráze nástroje,
- rádius vytvářeného profilu musí být minimálně jedenapůlkrát větší než hodnota rádia VBD,
- při přibližování nástroje z obloukové části řezu do lineární části řezu se postupně snižuje hodnota hloubky řezu a současně se zvyšuje hodnota posuvu z minimální určené na maximální určenou,
- eliminace nebo snížení výše uvedených negativních jevů při konvenční metodě [20]

Během konzultací s panem Tomášem Dlabalem, vedoucím oddělení technologie ve společnosti PCC, byla vedena diskuse na téma využití současných komerčních nástrojů a možných alternativ, které by mohly proces hrubovacího soustružení zefektivnit. Diskutované návrhy se tak staly motivem pro tvorbu vlastního prototypového nástroje, který je popsán v kapitole č. 5 *Experimentální část*, která je úvodní kapitolou praktické náplně této práce.

Níže jsou uvedeny návrhy a jejich opodstatnění:

- zavedení současného chlazení čelní a hřbetní části kruhové VBD
 - při hrubovacím soustružení titanových slitin bylo upozorováno primárně opotřebením na hřbetní straně VBD
 - chlazení na hřbetní stranu VBD by teoreticky mělo navýšit její životnost
 - nebyl nalezen komerčně dostupný nástroj umožňující současné chlazení čelní a hřbetní strany kruhové VBD,
- vyústění řezné kapaliny z upínek vyrobených metodou 3D tisku
 - umožňuje variabilitu řešení, tj. výměna upínky za takovou, jejíž směr tryskání řezné kapaliny vyhovuje typu prováděné operace (jiná část obvodu VBD v řezu),
- zkrácení vzdálenosti výstupního místa proudu řezné kapaliny a břitu nástroje
 - pomocí vytištěné upínky lze tuto vzdálenost výrazně zkrátit – výstup může být ve vzdálenosti cca o hodnotě poloměru VBD
 - na základě geometrie naskenovaného utvařeče třisek dané VBD lze optimalizovat konstrukci čelní upínky tak, aby proud řezné kapaliny vytvářel efektivní hydraulický klín

5 Experimentální část

Následující část práce se zabývá praktickým návrhem intenzivního chlazení, jeho realizací a experimentálním ověřením jeho přínosů.

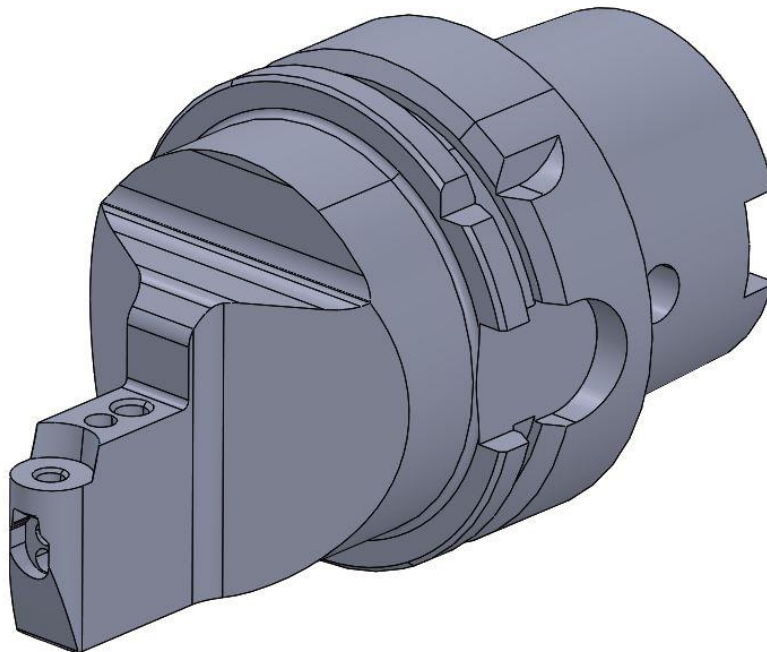
Cílem praktické části diplomové práce bylo provedení dvou experimentů, přičemž první z nich zkoumal vliv tlaku a způsobu přívodu řezné kapaliny na průběh opotřebování nástroje během procesu podélného hrubovacího soustružení slitiny titanu Ti6Al4V. Druhý experiment navazuje na výstupní data prvního experimentu a snaží se změnou parametru řezné rychlosti přiblížit limitním možnostem pro daný typ nástroje za určitých podmínek, přičemž je opět porovnávána životnost konkrétních variant.

Následující část bude popisovat nástroje, vybavení, podmínky a vyhodnocení jednotlivých experimentů.

Použité nástroje

Prvním typem nástroje byl komerčně běžně dostupný neutrální soustružnický nůž od společnosti Sandvik Coromat - typ C5 SRDCN00060-12AHPA, který byl detailně popsán v kapitole č. 4 *Současné nástrojové systémy pro hrubovací soustružení titanu*.

Tato podkapitola se bude věnovat popisu zbývajících druhého nástroje. Jako druhý nástroj se využil speciálně navržený prototypový model lišící se především ve způsobu vedení řezné kapaliny. Na obr. 22 je zobrazeno pouze tělo nástroje bez ostatních komponentů. Řezná geometrie nástroje je shodná s komerčním nástrojem C5 SRDCN00060 - 12AHPA.



Obrázek 22 – tělo prototypového nástroje vyrobeného v RTI ZČU

Při obecném porovnání s nástroji v komerční sféře představuje RTI prototyp originální řešení pomocí kombinace dvou faktorů, kterými jsou použití současného chlazení ze strany čela a hřbetu a kruhová VBD. Tato konstrukční varianta tak kombinuje výhody obou faktorů.

Nástroj je koncipován pro účely vysokotlakého chlazení. Jeho hlavní odlišností oproti nástroji od spol. Sandvik Coromat-C5 SRDCN00060-12AHPA je způsob vedení a vyústění řezné kapaliny. Design vedení řezné kapaliny bude představen v následujícím oddílu.

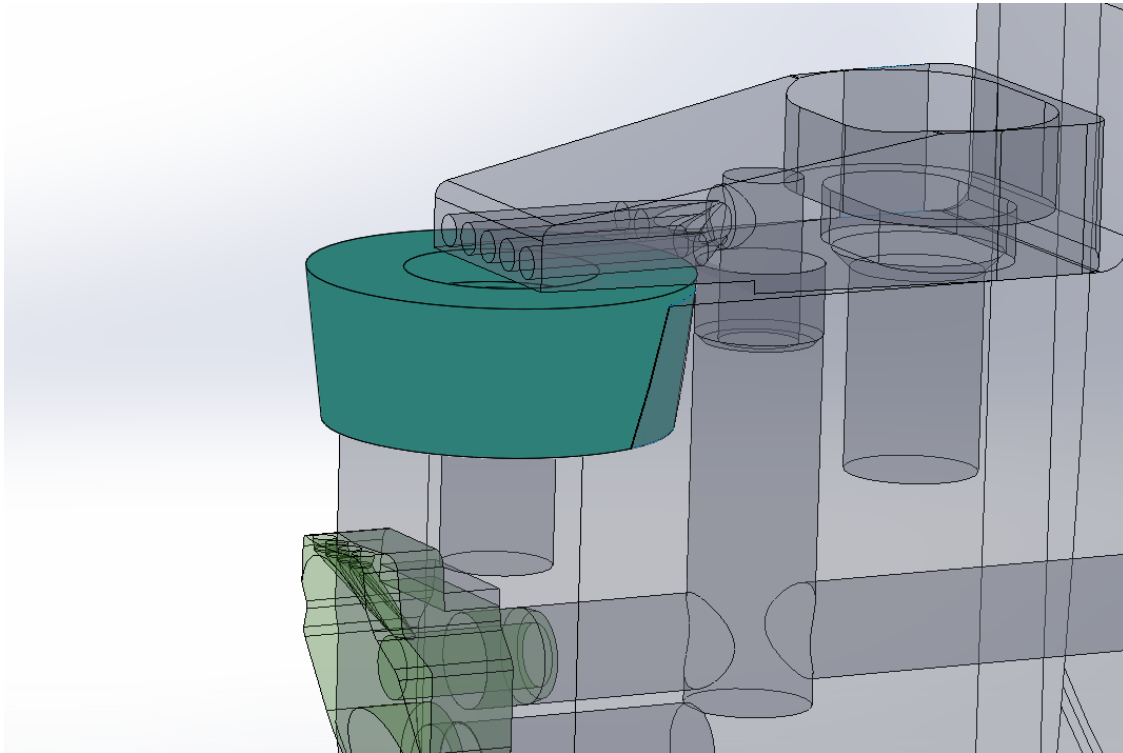
Na obr. 23 je vidět polotovar nástroje upnutý do speciálního přípravku v prostorách frézky připravený na zahájení výroby prototypového modelu.



Obrázek 23 – připravený polotovar na výrobu nástroje upevněný v prostorách frézky

Design vedení a vyústění řezné kapaliny prototypového nástroje

Konstrukce nástroje je navržena tak, aby výstupní místa řezné kapaliny byla v co možná nejkratší vzdálenosti vůči řezné hraně VBD. To je jeden z hlavních rozdílů oproti komerčnímu nástroji od spol. Sandvik Coromat. Přesného fokusování řezné kapaliny je docíleno pomocí dvou různých upínek vyrobených metodou 3D tisku. System tak umožňuje využívat současného výstupu řezné kapaliny z čelní i hřbetní strany. Pohled na umístění prvků chlazení v sestavě nástroje je znázorněn na obr. 24. Níže jsou popsány obě upínky.



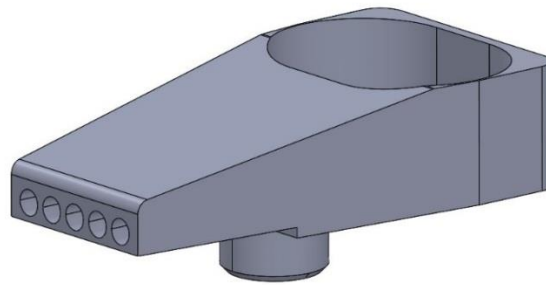
Obrázek 24 – soustava kanálků a upínek pro přívod řezné kapaliny

Upínka pro čelní chlazení

Jak již bylo uvedeno v teoretické části této práce, vliv přesného fokusování proudu řezné kapaliny velmi významně ovlivňuje proces lámání třísky, ale i snížení teploty v místě řezu. Snahou této konstrukční varianty bylo co možná nejvíce se přiblížit k řezné hraně a zajistit tak “sklouznutí” tryskající řezné kapaliny po čele VBD přes speciální utvářeč (značený MK) až pod vznikající třísku, která je následně oddělena v elementární (článkované) podobě. Tím je zamezeno potenciální riziko namotávání třísek nežádoucích typů kolem nástroje a zároveň zaručeno hospodárnější nakládání s třískovým odpadem.

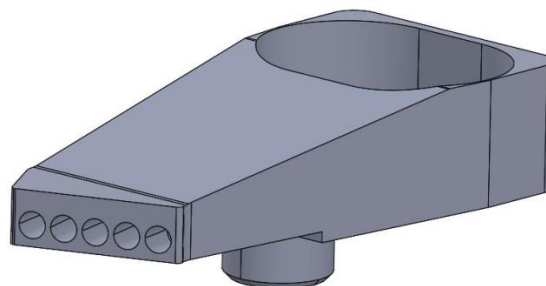
Kruhová VBD je schopna svou univerzálností najít uplatnění v mnoha typech soustružnických operací, z čehož vyplývá i různorodé zatěžování bříty po jeho obvodu. Pro zajištění fokusování řezné kapaliny do místa řezu je třeba přizpůsobit i konstrukci upínky, ze které médium tryská.

Na obr. 25 je vidět přímá varianta upínky, která byla použita pro účel podélného soustružení v rámci prováděného experimentu. Centrální kanál napojující se na vývod z nástrojového držáku se dále rozvětluje do 5 kanálků o průměru 1 mm. Upínka je k držáku VBD připevněna šroubovým spojem. Pro minimalizaci úniku kapalin je použit těsnící O-kroužek.



Obrázek 25 – přímá varianta čelní upínky

Na obr. 26 je varianta upínky s vývodem řezné kapaliny pod úhlem 18°.

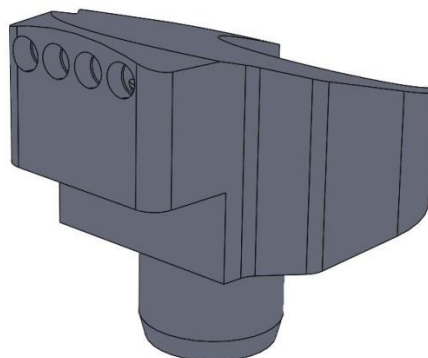


Obrázek 26 – varianta čelní upínky s vývodem řezné kapaliny pod úhlem 18°

Upínka pro chlazení hřbetu

Jak bude patrné z experimentu, právě chlazení na hřbetní straně VBD prokazatelně ovlivňuje životnost nástroje, což je v souladu s tvrzením v podkapitole č. 2.2 *Typy přívodu řezné kapaliny do místa řezu*.

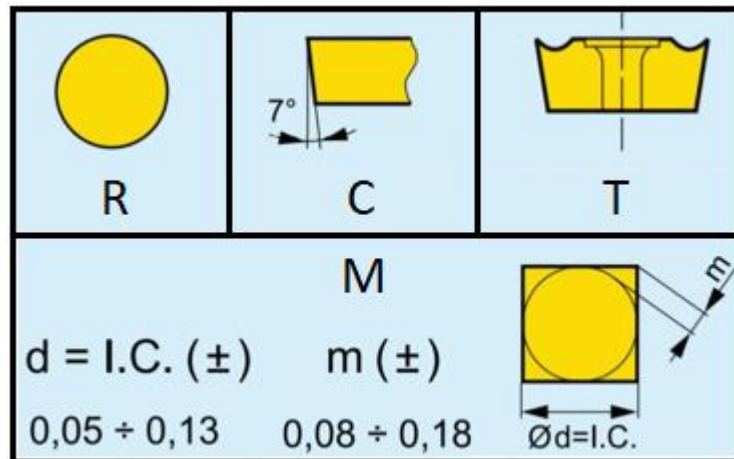
Centrální kanál napojující se na vývod z nástrojového držáku se dále rozvětvuje do 4 kanálků o průměru 0,7 mm. Upínka je k držáku VBD připevněna šroubovým spojem. Pro minimalizaci úniku kapalin je použit těsnící O-kroužek. Upínka je znázorněna na obr. 27.



Obrázek 27 – upínka pro přívod řezného média na hřbet VBD

Vyměnitelná břitová destička

Tato část popisuje VBD použitou při obou experimentech. Jedná se o variantu kruhové VBD typu RCMT 1204M0–MK od společnosti Iscar. Níže je na obr. 28 schematicky popsán význam jednotlivých písmen v souladu s ISO značením.



Obrázek 28 – ISO značení VBD [19]

Společným prvkem obou variant nástrojů byla vyměnitelná břitová destička ze slinutého karbidu třídy IC07 typu RCMT 1204MO–MK od společnosti Iscar. Jedná se o kruhovou VBD s úhlem hřbetu 7° a průměrem 12 mm. VBD není deponována tenkou vrstvou. Poslední dvě písmena v názvu VBD značí typ utvařeče třisek. MK je speciální typ, který není běžně prodejný (zakázkově pro PCC), proto jeho geometrie nemůže být v rámci této práce popsána. Tato VBD je společně s nástrojem C5 SRDCN00060-12AHPA od společnosti Sandvik Coromat v PCC běžně používána. Na obrázku níže (obr. 29) je zobrazena popisovaná VBD. [23]



Obrázek 29 – ilustrační obrázek VBD typu RCMT 1204MO–MK [23]

Opodstatnění pro použití VBD kruhového tvaru bylo argumentováno v kapitole č. 5 *Současné nástrojové systémy pro hrubovací soustružení titanu*. Zbývá tedy odpovědět ještě na jednu otázku. Proč nevyužít u takto problematického materiálu z hlediska obrobitelnosti třídu karbidu disponující deponovanou tenkou vrstvou, která, jak uvádí výrobci, má zabránit prostupu tepla do nástroje?

Třída jakosti slinutého karbidu této VBD je IC07. Jedná se o karbid bez deponované tenké vrstvy s jemným substrátem pro obrábění vysokoteplotních slitin a nerez ocelí při nízkých až středních řezných rychlostech. Proč je používána VBD bez deponované tenké vrstvy? I když přibližně 80-90 % produkce VBD ze slinutých karbidů spadá do kategorie VBD s deponovanou tenkou vrstvou, VBD bez těchto vrstev stále nachází uplatnění, a to zejména při obrábění žáruvzdorných slitin a slitin na bázi titanu. Navzdory značné rychlosti opotřebení VBD lze toto opotřebení dobře kontrolovat, navíc se zde projevuje samoostřicí schopnost. Lze tedy tvrdit, že proces opotřebování je poměrně předvídatelný, což je zásadní výhoda. [23]

Řada tenkých vrstev je však na bázi titanu např. Ti(C,N) - odolnost proti opotřebení otěrem, což zmenšuje opotřebení na hřbetu nástroje; TiN - odolnost proti opotřebení; (Ti,Al)N - vysoká tvrdost a odolnost proti oxidaci, přispívá k odolnosti proti opotřebení. Potenciální interakce mezi chemicky příbuzným základním (obráběným) materiálem a složením tenké vrstvy není přípustná. Již v minulosti se ve spol. PCC zkoušely testovat možné přínosy VBD s deponovanými tenkými vrstvami při obrábění titanových slitin. Nebyly zpozorovány žádné benefity, které by vedly k rozhodnutí nasadit tyto VBD do obráběcích procesů. Je třeba podotknout, že např. společnost ISCAR, která také zastává názor, že pro obrábění titanových slitin jsou vhodné VBD bez deponovaných tenkých vrstev, v krajních případech doporučuje použít (proti prostupu tepla) tenké vrstvy nanesené metodou PVD (metoda PVD by měla zaručovat lepší zachování ostrosti řezné hrany). Při používání deponovaných destiček apelují na sledování chemického složení, protože titan má při vysokých teplotách obrábění mnohdy tendenci chemicky reagovat s prvky obsaženými v tenké vrstvě, čímž pak dochází ve zvýšené míře k tvorbě nárůstků na řezné hraně. [22]

Řezná kapalina

Při obrábění titanových slitin je doporučováno využívat řezné kapaliny se současně mazacími a chladícími účinky. Není příliš vhodné používat kapaliny zajišťující pouze mazací nebo jen chladící efekt. Doporučuje se používat emulze s koncentrací 4 až 6 %, polosyntetické řezné kapaliny s koncentrací 8 až 12 % a syntetické řezné kapaliny s koncentrací 3 až 4 %. Koncentrace řezných kapalin též závisí na řezných podmínkách.

Jako řezná kapalina byla použita vodou ředitelná chladící a mazací emulze Blasocut BC 35 Kombi od společnosti Blaser Swissslube CZ, s.r.o. Koncentrace emulze byla měřena před experimentem (bude popsáno v podmínkách experimentu).

Složení této emulze je:

- 2-mercaptopyridine-n-oxid, monohydrát v množství < 2,5 ml v jednom litru směsi
- 2-Butyl-benzo(d)isothiazol-3-one v množství < 1 ml v 1 litru směsi [24]

Výchozí polotovár

Výchozím polotovarem pro experiment byla kruhová tyč z materiálu Ti-6Al-4V o průměru 250 mm a délce 500 mm. Hmotnost polotovaru čítala 108,73 kg. Specifikace vlastností slitiny Ti-6Al-4V byla uvedena v kapitole č. 3 *Slitina Ti-6Al-4V a její obrobiteľnosť*.

Strojní vybavení a ostatní zařízení

Níže je uveden výčet použitého strojního vybavení a ostatního zařízení, které bylo použito při experimentu. Technické specifikace včetně ilustrací jsou k nalezení v příloze č. 1 této práce.

CTX Beta 1250 TC

CTX Beta 1250 TC je soustružnicko frézovací CNC centrum, na němž probíhal samotný experiment.

Zoller Genius 3S

Jedná se o měřicí stroj pro všechny druhy nástrojů pro třískové obrábění s pěti CNC řízenými osami. Měření na stroji může probíhat plně automaticky.

Keyence VHX-6000

Pro vyhodnocování opotřebení VBD byl použit optický mikroskop od společnosti Keyence řady VHX-6000. Zařízení umožňuje zaostřit obraz ve více hloubkách, což je pro vyhodnocování opotřebení VBD kruhového tvaru nezbytná vlastnost.

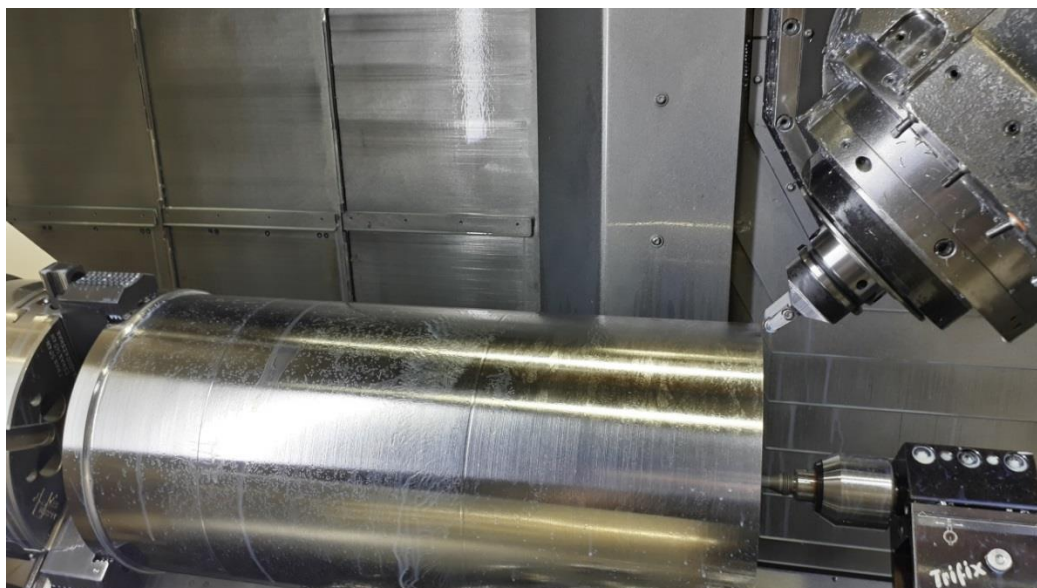
5.1 Experimentální porovnání životnosti nástrojů

Úvodem je třeba zmínit, že praktická část zahrnuje dva odlišné typy experimentů, proto bude každému typu věnována samostatná podkapitola. Oddíly příslušné podkapitoly experimentu popisují jeho podmínky, postup včetně očekávání průběhu a v neposlední řadě zhodnocení výsledků.

5.1.1 Popis a plán experimentu

Cílem experimentu bylo porovnat vlivy různých systémů přívodů řezné kapaliny do místa řezu a hodnot tlaků těchto kapalin na životnost nástrojů při hrubovacím podélném soustružení kruhové tyče ze slitiny Ti-6Al-4V. Pro testování se použily zmíněné dva typy nástrojů. Zkoumaným a hodnoceným parametrem byla životnost nástroje (vyjádřená v minutách), přičemž vyhodnocení životnosti bylo provedeno na základě maximálního opotřebení hřbetu značeného jako VB_{max} (zkoumání opotřebení čela v tomto případě nemá význam - téměř veškeré opotřebení je soustředěno na hřbetní část VBD), načež se stanovila jeho kritická hodnota $VB_{krit} = 0,3$ mm, tedy limitní hodnota, při jejímž dosažení bylo nutné testování zastavit. Hodnota $VB_{krit} = 0,3$ mm byla vybrána vzhledem k možnému limitnímu opotřebení VBD, do kterého je nástroj schopen zaručit spolehlivý proces obrábění. Při přesahu hodnot kritického opotřebení často dochází ke stržení řezné hrany. Pro vyhodnocování opotřebení byl využíván optický mikroskop VHX-6000. Výstupem jsou data demonstrující časový průběh opotřebení nástroje v závislosti na použitém systému chlazení a hodnotách tlaku, z nichž je nadále vyhodnocena životnost nástroje.

Obráběný díl byl upnut z jedné strany tvrdými čelistmi v univerzálním sklíčidle, z druhé strany přitlačen otočným hrotem. Použitelná délka soustružnického přejezdu se stanovila na 490 mm (od 500 mm byla odečtena délka upínací části včetně bezpečné rezervy). Způsob upnutí v prostoru stroje je znázorněn na obr. 30. Na stejném obrázku je také vidět upnutí nástroje ve vřetenové hlavě. Úhel vůči ose obrobku je 45° . Směr podélného soustružení probíhal konvenčním způsobem - tedy směrem k vřetenu.



Obrázek 30 – upnutý polotovar připravený k obrábění

Řezné podmínky byly nastaveny dle aktuálně ověřených a používaných hodnot ve společnosti PCC. Podmínky zůstávaly po celou dobu prvního experimentu neměnné.

Řezné podmínky:

- $v_c = 90 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$
- $f = 0,25 \text{ [ot.min}^{-1}\text{]}$
- $a_p = 2 \text{ [mm]}$

Řezná kapalina:

- Blasocut BC 35 Kombi - koncentrace 15 %

Plán experimentu

- jedná se o plánovaný úplný faktorový experiment na dvou úrovních, kde jsou kombinovány faktory kvalitativního (typ nástroje, způsob chlazení) a kvantitativního (hodnota tlaku) charakteru
- experiment se skládá z 6 typů pokusů, kdy každý pokus byl opakován třikrát, celkem tedy proběhlo 18 opakování
- sledovaným ukazatelem kvality je životnost nástroje T a průběh opotřebení P

Tabulka 3 zobrazuje jednotlivé faktory a jejich uvažované úrovně.

faktor	označení	úrovně faktorů
nástroj	t	Sandvik, prototyp RTI
chlazení	c	čelo, čelo + hřbet
tlak [bar]	p	20 bar, 100 bar

Tabulka 3 – faktory a jejich úrovně

Plán experimentu je patrný z tabulky 4.

pokus č.	t	c	p
1	Sandvik	čelo	20 bar
2	Sandvik	čelo	100 bar
3	prototyp RTI	čelo	20 bar
4	prototyp RTI	čelo	100 bar
5	prototyp RTI	čelo + hřbet	20 bar
6	prototyp RTI	čelo + hřbet	100 bar

Tabulka 4 – plán experimentu

Průběh experimentu

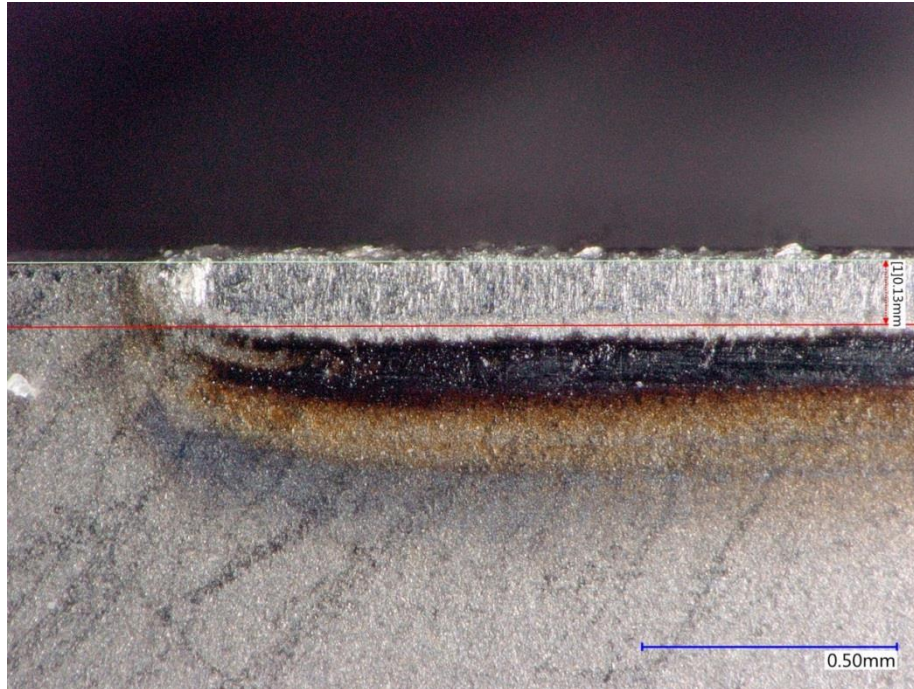
Po nastavení úrovní jednotlivých faktorů bylo přistoupeno k samotnému testování. Nástroj s novou řeznou hranou obrobil předem nastavenou délku přejezdu. Následovalo vyjmutí nástroje ze sklíčidla a přemístění do přípravku umístěného na stole optického mikroskopu. Bylo naměřeno a zaznamenáno prvotní opotřebení hřbetu. Proces obrábění a naměrů opotřebení byl opakován, dokud se hodnota opotřebení hřbetu nepřibližovala nebo nedosahovala kritické hodnoty $VB_{krit} = 0,3$ mm, poté byla vyměněna řezná hrana a celý pokus se opakoval ještě dvakrát. Poslední délky přejezdů byly často nastaveny na menší hodnoty z důvodu bezpečnějšího přibližování se ke kritické hodnotě opotřebení. V případě, že by opotřebení přesáhlo hodnotu VB_{krit} , by nebylo možné takové opakování považovat za platné.

Na obr. 31 je vidět stanoviště pro měření a vyhodnocování opotřebenosti hřbetu VBD pomocí optického mikroskopu Keyence VHX 6000. Snímaná VBD je vidět na zobrazovacím zařízení (součástí Keyence VHX 6000), na němž lze pořídit obrazový záznam zahrnující kóty reprezentující opotřebení hřbetu VB_{max} . Pro optimální zobrazení bylo použito ovládací zařízení mikroskopu, kde se nastavila hodnota přiblížení (snímky byly pořízeny při hodnotě přiblížení 200x), osvětlení snímku a hloubka hladin pro zaostření.



Obrázek 31 – optický mikroskop Keyence VHX 6000 používaný pro zjišťování hodnot

Pro názornou představu je na obr. 32 zobrazen snímek VBD včetně naměřené hodnoty opotřebení. Veškeré snímky korespondující s hodnotami uvedenými v oddílu 5.6.3. *Vyhodnocení experimentu* jsou uvedeny v příloze č. I této práce.



Obrázek 32 – snímek z optického mikroskopu Keyence VHX 6000 včetně zanesené hodnoty opotřebení $VB_{\max} = 0,13$ [mm]

5.1.2 Očekávaný průběh experimentu

Vzhledem ke konstrukční povaze komerčního nástroje od spol. Sandvik Coromat nedisponující možností chladit VBD na hřbetní straně, se očekává strmější nárůst opotřebení VB_{\max} . Teorie uvádí, že právě chlazení hřbetní strany má zásadní vliv na životnost nástroje. U tohoto typu soustružnické operace navíc primárně dochází k opotřebení hřbetní části VBD, proto absence chlazení na hřbet pravděpodobně způsobí horší kontrolu opotřebení a zároveň zkrácení životnosti nástroje. Rozdílnost použitých tlaků řezné kapaliny směřující na čelo VBD by se v tomto případě měla projevit především na lepší lámavosti třísky a jejího odvodu z místa řezu, ale též částečným navýšením životnosti vlivem odvodu tepla. Vzhledem k popsanému charakteru opotřebení VBD (primárně opotřebení hřbetní strany) lze předpokládat menší efekt vysokotlakého chlazení čelní části VBD na životnost nástroje než u dříve prováděných experimentů popsaných v kapitole *1 Analýza současného stavu*. Použitím nástroje od spol. Sandvik Coromat se po aplikaci vysokotlakého chlazení očekává spíše přínos z hlediska lepší lámavosti třísek.

U prototypového nástroje bude zajímavé sledovat rozdíl v efektivitě chlazení čelní upínkou (při zaslepeném výstupu upínky pro chlazení hřbetu VBD) vzhledem ke značnému zkrácení vzdálenosti výstupu řezné kapaliny od místa řezu oproti nástroji od spol. Sandvik. Může být předpokládán kvalitnější proces lámání třísky a jejího odvodu z místa řezu vlivem lepšího fokusování řezné kapaliny. Otázkou zůstává, zda se tento technologický zásah pozitivně projeví i na životnosti nástroje. Od způsobu chlazení, jenž je aplikován na prototypovém nástroji, je očekáván hlavně přínos z hlediska prodloužení životnosti nástroje,

a to v důsledku možnosti chlazení současně čela i hřbetu VBD. Experiment by měl potvrdit předpoklad, že správně zvolené parametry a konstrukční provedení chladicího systému společně s vysokotlakým chlazením vede ke značnému prodloužení životnosti nástroje a dobré předvídatelnosti opotřebení.

5.1.3 Vyhodnocení experimentu

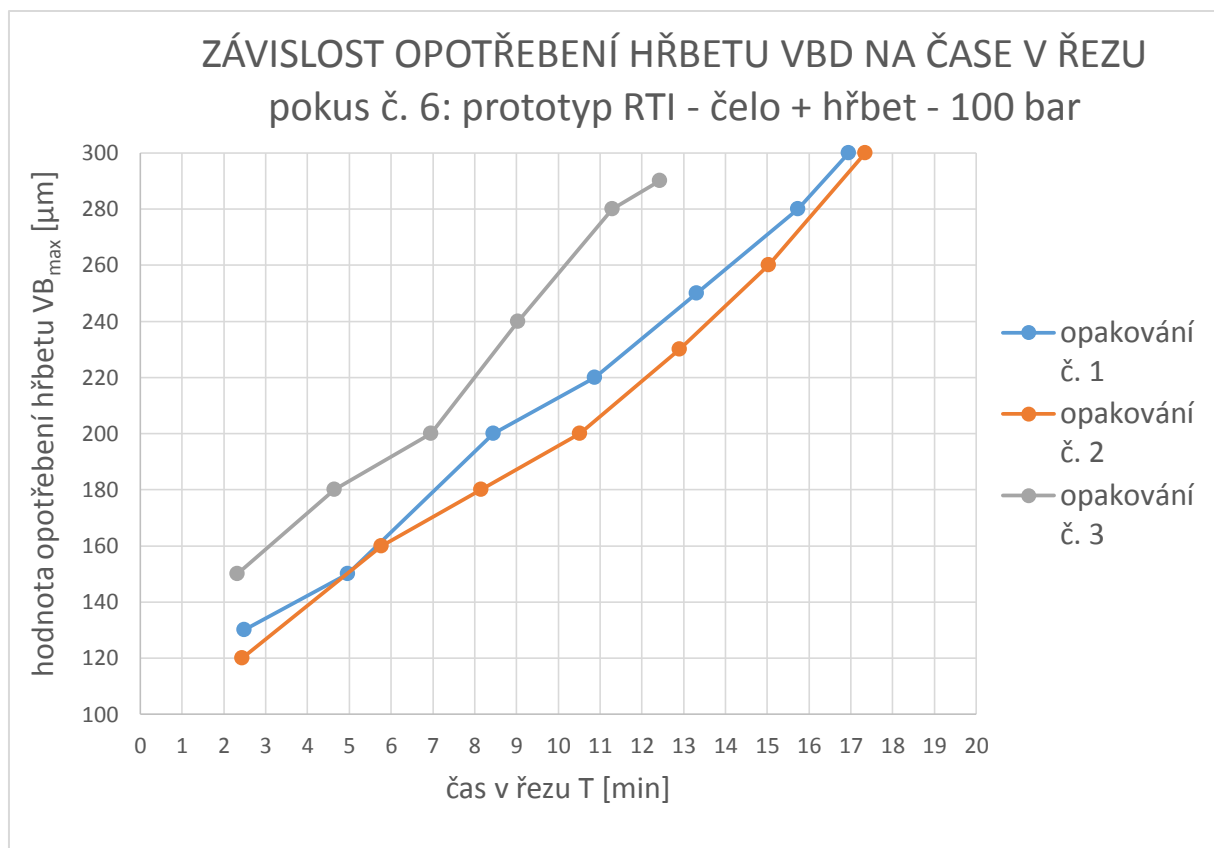
Po dokončení experimentu se přistoupilo k samotnému analyzování výsledků. Pro každý pokus (potažmo všechna tři opakování každého pokusu) byly provedeny následující kroky:

- 1) přezkoumání všech snímků opotřebení hřbetu zachycených na optickém mikroskopu
- 2) vytvoření tabulek obsahujících údaje o opotřebení hřbetu VBD vzniklého za určitý čas nástroje v řezu (přepočteno z délky přejezdu) – příklad viz tabulka 5.

POKUS Č. 6 - prototyp RTI - čelo + hřbet - 100 bar					
opakování č. 1		opakování č. 2		opakování č. 3	
čas v řezu [min]	opotřebení [μm]	čas v řezu [min]	opotřebení [μm]	čas v řezu [min]	opotřebení [μm]
2,49	130	2,43	120	2,32	150
4,97	150	5,77	160	4,64	180
8,45	200	8,15	180	6,95	200
10,88	220	10,52	200	9,04	240
13,31	250	12,9	230	11,3	280
15,74	280	15,03	260	12,43	290
16,95	300	17,35	300		

Tabulka 5 – příklad záznamu hodnot časů v řezu a opotřebení pro pokus č. 6 a jeho opakování

- 3) vytvoření grafů reprezentujících závislosti opotřebení hřbetu VBD na času nástroje v řezu – příklad na obr. 33 a 34

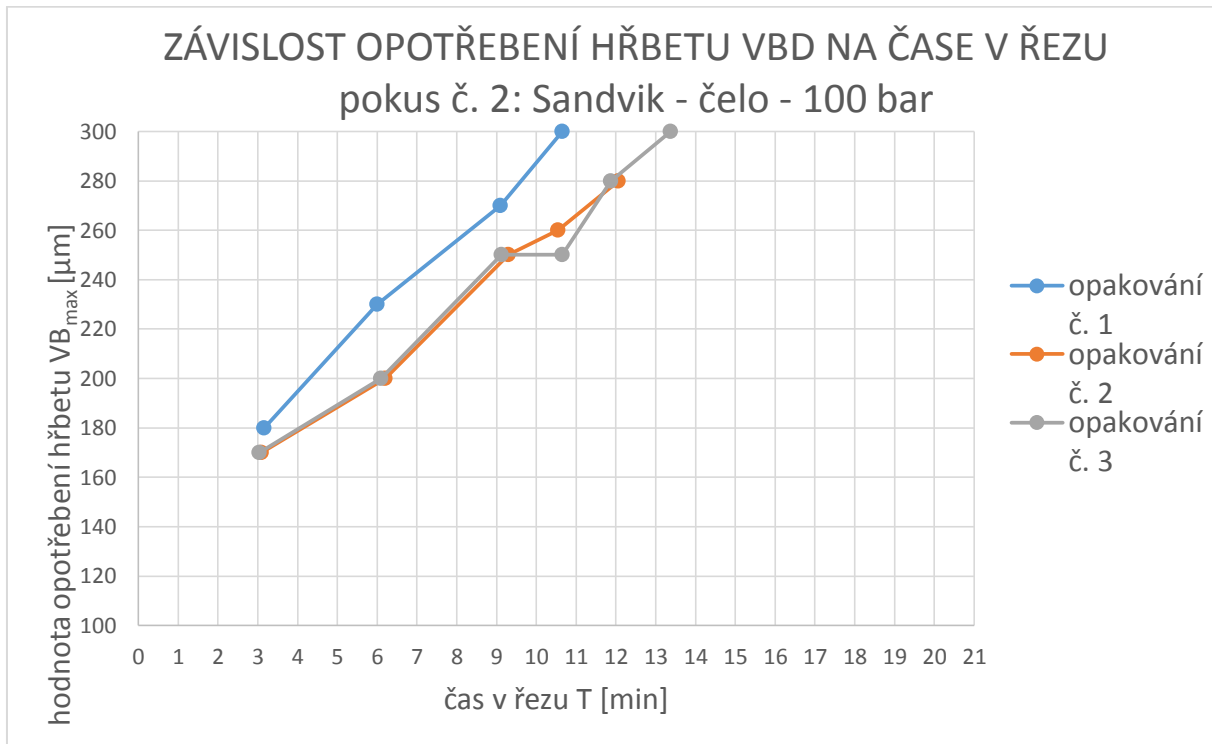


Obrázek 33 – časový průběh opotřebení při použití prototypového nástroje při vysokotlakém kombinovaném přívodu řezné kapaliny

Porovnáme-li průběh trendu opotřebení (VB_{max}) při použití prototypového nástroje RTI s variantou kombinovaného vysokotlakého chlazení na obr. 33 a komerčního nástroje s variantou vysokotlakého čelního chlazení na obr. 34, je na první pohled vidět rozdíl ve strmosti křivek jednotlivých variant. Tento jev představuje pozvolnější průběh opotřebení, který je zapříčiněn zavedením přívodu řezné kapaliny na hřbet VBD, což se ve výsledku pozitivně projevilo na životnosti nástroje. Níže jsou uvedeny rozdíly v průměrné životnosti pro daná technologická řešení.

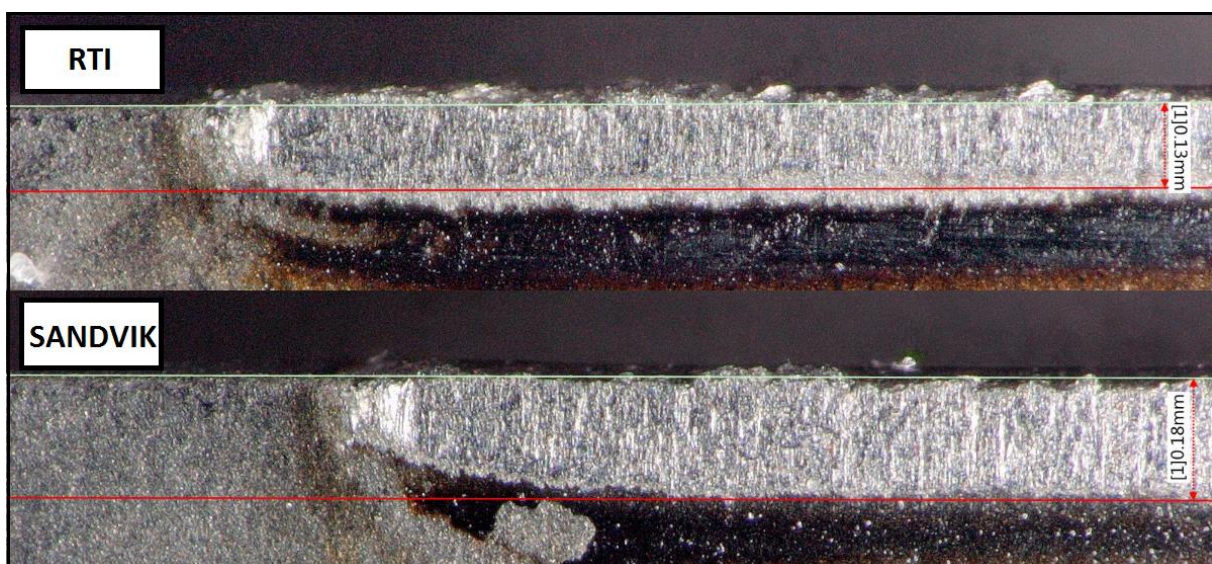
- průměrná životnost nástroje RTI – 20 bar – čelo + hřbet = 14,89 [min]
- průměrná životnost nástroje RTI – 100 bar – čelo + hřbet = 15,58 [min]
- průměrná životnost nástroje Sandvik Coromat – 20 bar – čelo = 12,62 [min]
- průměrná životnost nástroje Sandvik Coromat – 100 bar – čelo = 12,03 [min]
- průměrná životnost nástroje RTI – 20 bar – čelo = 12,53 [min]
- průměrná životnost nástroje RTI – 100 bar – čelo = 11,37 [min]

Předpoklad pozitivního vlivu na životnost nástroje při zavedení přívodu řezné kapaliny na hřbet VBD byl naplněn. Vliv tlaku řezného média směřovaného na čelo VBD se z hlediska prodloužení životnosti ukázal jako nepodstatný, což vzhledem k výsledkům experimentů uvedených v úvodní analýze nebylo očekáváno.



Obrázek 34 - časový průběh opotřebení při použití komerčního nástroje při vysokotlakém kombinovaném přívodu řezné kapaliny

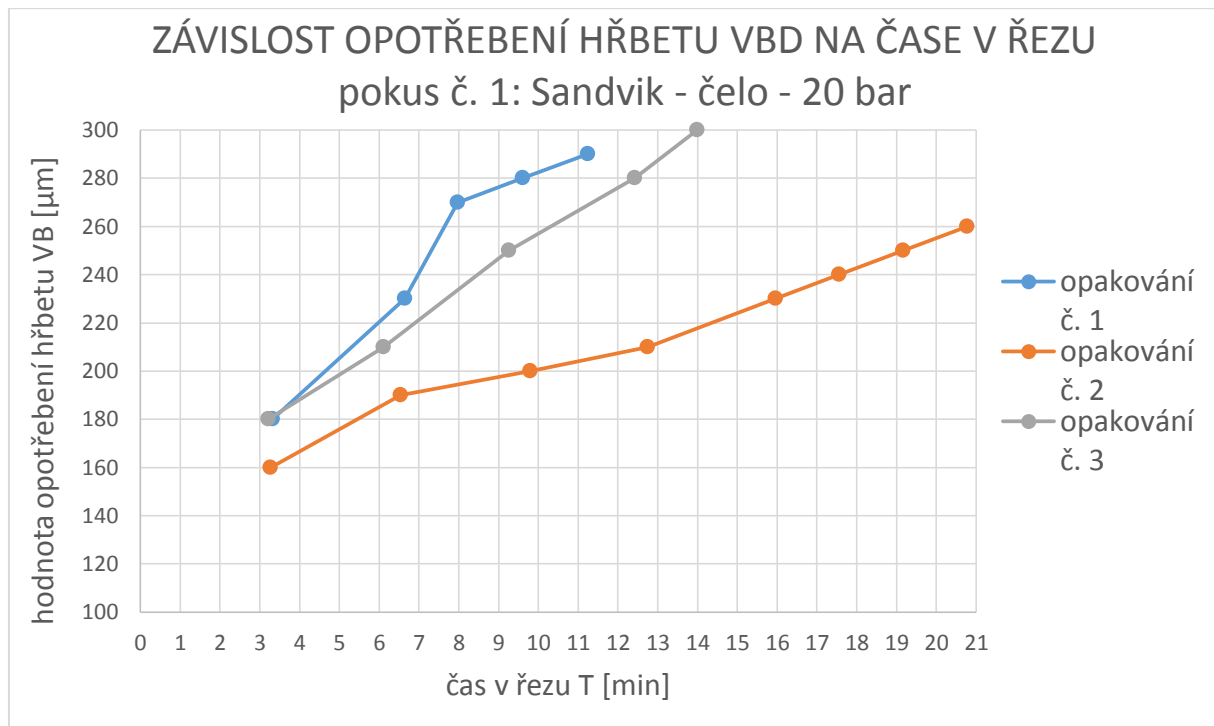
Na mikroskopickém snímku znázorněném na obrázku 35 je demonstrována rozdílnost v maximálním opotřebení hřbetu (VB_{max}) při prvotním soustruženém přejezdu o délce 100 [mm]. Oba případy jsou zachyceny při tlaku řezného média 100 [bar], kdy pro prototypový RTI nástroj bylo použito kombinované chlazení, kdežto u komerčního nástroje od spol. Sandvik Coromat pouze čelní chlazení. Vstup a výstup nástroje do řezu je považován vůbec za nejproblematictější sekvence obrábění, proto vytvoření předpokladu pro předvídatelný a rovnoměrný průběh obrábění bez výrazných výkyvů je výrazným pozitivem.



Obrázek 35 – rozdílnost opotřebení u různých technolog. variant po prvotním soustruženém přejezdu

Vyloučení hrubé chyby

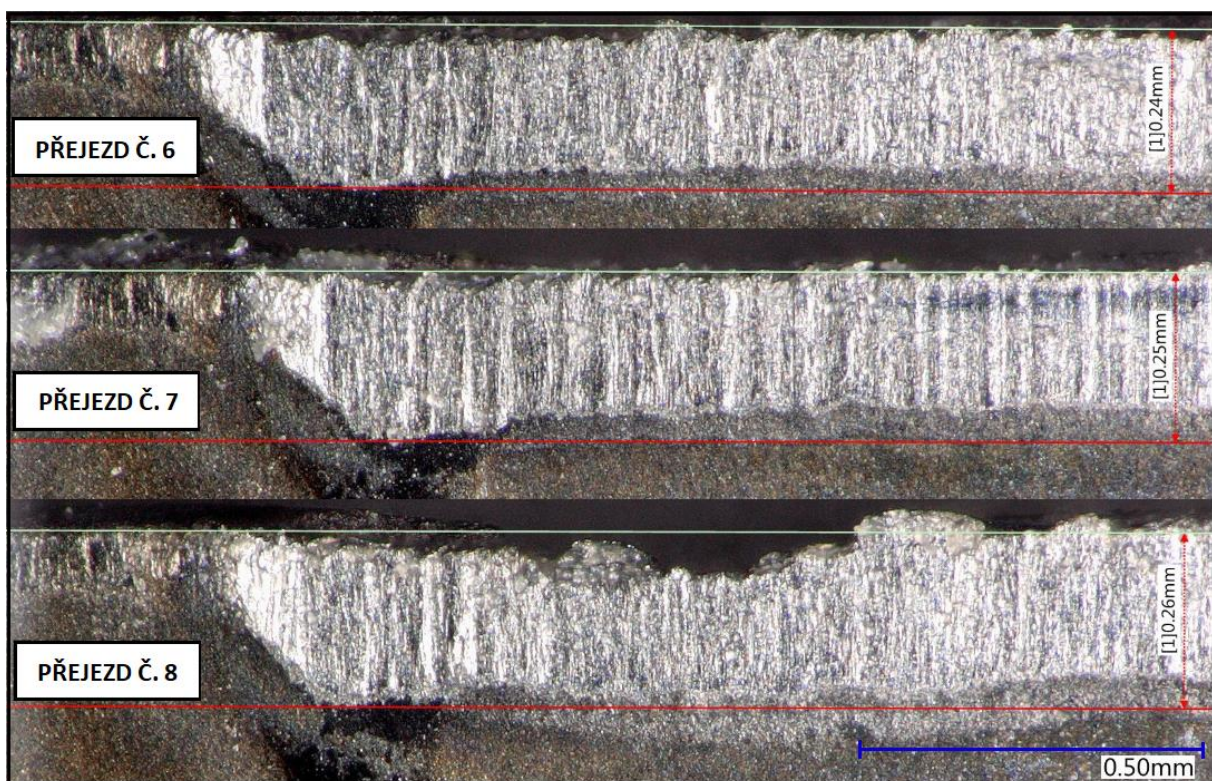
Po provedení výše zmíněné analýzy všech pokusů bylo zjištěno podezření na hrubou chybu měření u pokusu č. 1 – opakování č. 2., kdy se trend vývoje opotřebení v závislosti na čase nástroje v řezu výrazně lišil od opakování č. 1 a 3. viz obr. 36. Z grafu je patrné, že trend opotřebení má velmi pozvolný průběh, což se o zbylých dvou opakováních prohlásit nedá. Tento fakt byl podnětem pro hlubší prozkoumání situace ve snaze odhalit příčinu možné difference. Pozornost byla věnována opětovnému prozkoumání VBD pod optickým mikroskopem a přezkoumání snímků vzniklých v průběhu experimentu.



Obrázek 36 – hrubá chyba vzniklá při 2. opakování 1. pokusu

Výsledkem přezkoumání bylo zjištění chyby vzniklé při vyhodnocování snímků na optickém mikroskopu. Jak je vidět na obr. 37, u posledního soustruženého přejezdu došlo ke stržení rezné hrany. Lze předpokládat, že k deformaci došlo vlivem nestandardního opotřebení (jiný typ než sledované opotřebení hřbetu), které bylo akumulováno v průběhu předchozích soustružených přejezdů. Tento jev pak zapříčinil odlišný časový průběh opotřebení. Je třeba brát v potaz, že do procesu testování mohla vstoupit řada nezaznamenaných faktorů (vibrace, vznik stabilní mikrogeometrie ostří atd.), které ve své synergii přispěly ke vzniku zmiňovaného trendu opotřebení.

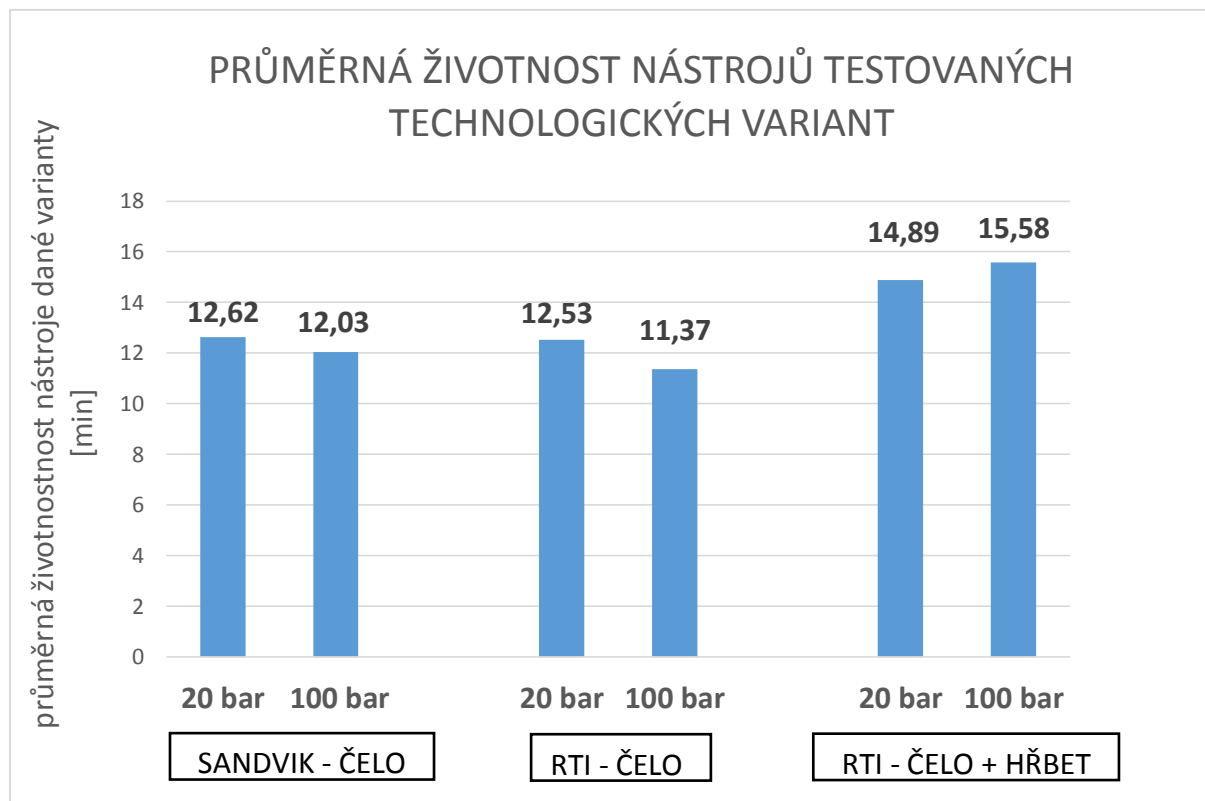
Opakování č. 2 u pokusu č. 1 se prohlásilo za hrubou chybu měření a je považováno za neplatné.



Obrázek 37 – neplatné opakování vlivem hrubé chyby vzniklé při odečítání VB_{\max}

Závěrečné shrnutí

Obr. 38 porovnává průměrnou životnost (průměr ze všech platných opakování pro daný pokus) nástrojů jednotlivých technologických variant.



Obrázek 38 – průměrné životnosti nástrojů jednotlivých technologických variant

Jak je vidět na obr. 38, varianty využívající současné chlazení čelní a hřbetní strany svou průměrnou hodnotou životnosti dosáhly předních pozic v tomto porovnání. Potvrdilo se několik předpokladů zmiňovaných v podkapitole 5.2 *Očekávání od experimentu*, a to:

- řezná kapalina směřovaná na čelo VBD neměla v tomto případě přímý vliv na prodloužení životnosti nástroje
- vysokotlakým směřováním řezné kapaliny na čelo VBD u obou typů nástrojů bylo docíleno velmi příznivého elementárního tvaru třísky
- řezná kapalina směřovaná na hřbet VBD má pozitivní vliv na životnost nástroje

Průměrná hodnota variant s kombinovaným typem chlazení dosahuje o 26 % delší životnosti nástroje než průměrná hodnota životnosti všech variant využívající pouze čelní chlazení.

Na základě těchto výsledků lze určit nejvýznamnější faktor, kterým je technologie či způsob chlazení – ve faktorovém plánu uvedeno jako chlazení (c). Z mikroskopických snímků, které byly pořízeny při testování variant s kombinovaným chlazením, je vidět, jak je řezná hrana opotřebena poměrně rovnoměrně, což svědčí o přidané hodnotě této technologie

zejména z hlediska předvídatelnosti procesu obrábění. Mikroskopické snímky opotřebení pro všechny pokusy a opakování jsou součástí přílohy č. 1 této práce.

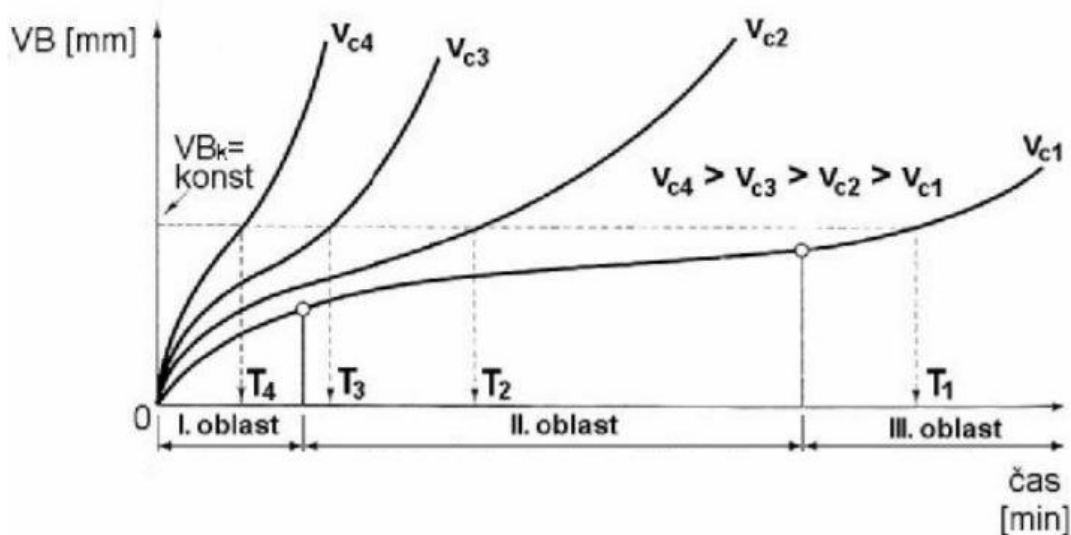
5.2 Experimentální porovnání životnosti nástrojů za zvýšené řezné rychlosti

5.2.1 Popis a plán experimentu

Na úvod je třeba zmínit, že tento test vycházel z předchozího experimentu. Veškeré strojní vybavení, řezná kapalina, obráběný polotovar a nástroje zůstávaly stejné. Podmínky a plán experimentu jsou popsány níže.

U předešlé části experimentu se řezné podmínky (v_c , f , a_p) nastavily jako jednoúrovňový faktor. Nebylo tak možné zjistit, jak se dané nástroje budou chovat např. při změně řezné rychlosti, která má ze všech řezných podmínek největší dopad na životnost nástroje včetně vývoje jeho opotřebení. Obr. 39 jasně dokazuje, že se vzrůstající řeznou rychlostí je markantně navýšeno tempo opotřebení. Ideální řezná rychlost reprezentována křivkou v_{c1} pak představuje průběh opotřebení rozdělený na I., II. a III. oblast, přičemž platí:

- I. oblast – zaběhnutí
- II. oblast – normální opotřebení
- III. oblast – zrychlené opotřebení [21]



Obrázek 39 – časový průběh opotřebení pro jednotlivé řezné rychlosti [21]

Pro plné využití potenciálu nástroje je výhodné nalézt jeho limity a stanovit tak krajní parametry, které by měl technolog při určování řezných podmínek respektovat. Důvody respektování omezujících kritérií jsou technického a zároveň ekonomického charakteru.

Navazující experiment si kladl za cíl porovnat obě varianty nástrojů (stejně typy jako u experimentu v podkapitole 5.1 *Experimentální porovnání životnosti nástrojů*) při řezných rychlostech přibližujících se možnému maximu pro danou konstrukční variantu a podmínky obrábění.

Konstantní řezné podmínky:

- $f = 0,25 \text{ [ot.min}^{-1}\text{]}$
- $a_p = 2 \text{ [mm]}$

Řezná kapalina:

- Blasocut BC 35 Kombi - koncentrace 15 %

Plán experimentu

- jedná se o plánovaný úplný faktorový experiment na dvou úrovních, kde jsou kombinovány faktory kvalitativního (typ nástroje - způsob chlazení) a kvantitativního (řezná rychlost, hodnota tlaku) charakteru viz tabulka
- experiment se skládá ze 4 typů pokusů, kdy každý pokus byl opakován jedenkrát, celkem tedy proběhla 4 opakování
- sledovaným ukazatelem kvality je životnost nástroje T

faktor	označení	úrovně faktorů
nástroj	t	Sandvik, prototyp RTI
chlazení	c	čelo, čelo + hřbet
tlak [bar]	p	75 bar, 100 bar
$v_c \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$	v	110, 130

Tabulka 6 – faktory a jejich úrovně

pokus č.	t	c	p	v
1	Sandvik	čelo	75 bar	110
2	Sandvik	čelo	100 bar	130
3	prototyp RTI	čelo + hřbet	20 bar	110
4	prototyp RTI	čelo + hřbet	100 bar	130

Tabulka 7 – plán experimentu

Průběh experimentu

Průběh experimentu se skládal ze stejných kroků, jako tomu bylo u předešlého experimentu. Cyklus obrábění – měření opotřebení hřbetu bylo opakováno, dokud nebylo dosaženo kritické hodnoty opotřebení, tzn. $VB_{\max} = VB_{\text{krit}}$

5.2.2 Očekávaný průběh experimentu

Fakt, že směřování řezné kapaliny na hřbet nástroje mělo pozitivní vliv na průběh opotřebování a celkově životnost nástroje, je jasný z předchozího experimentu.

Vyšší hodnoty řezné rychlosti budou mít pravděpodobně rozhodující vliv na životnost nástroje, jelikož řezná rychlost má největší podíl ze všech parametrů na generování tepla při obrábění.

Bude zajímavé sledovat, jestli vliv navýšené hodnoty řezné rychlosti z dolní úrovně o hodnotě $110 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ na horní úroveň o hodnotě $130 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ bude kompenzován z hlediska opotřebení nástroje též zvýšením tlaku z dolní úrovně o hodnotě 75 [bar] na horní úroveň o hodnotě 100 [bar] .

5.2.3 Vyhodnocení experimentu

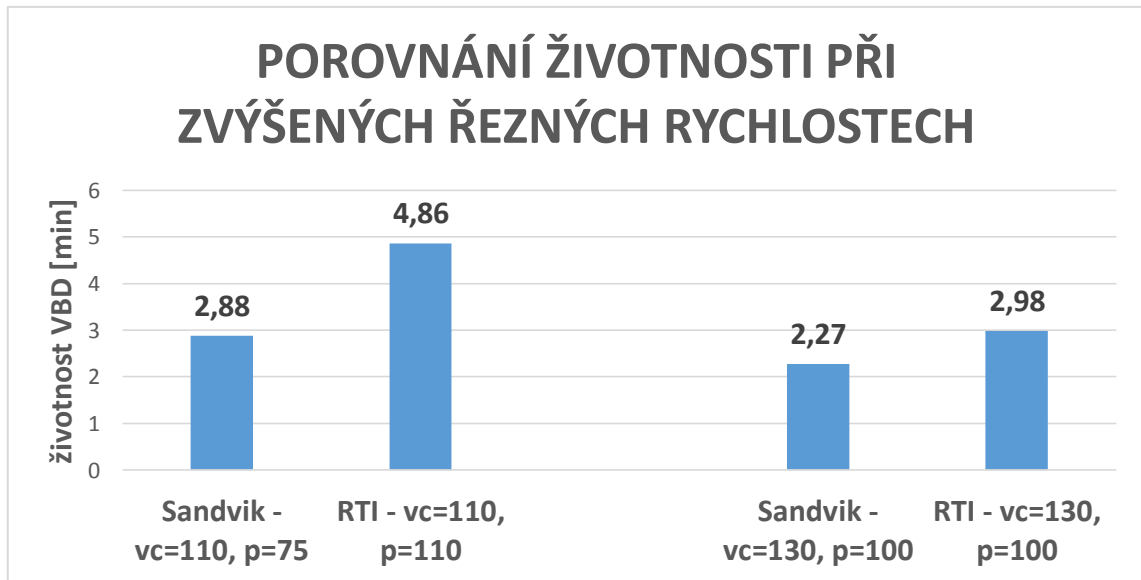
Před samotným začátkem experimentu bylo třeba stanovit obě hodnoty úrovní řezných rychlostí. Oproti předchozímu testování se jednalo o praxi (ve spol. PCC) neproověřené řezné rychlosti. Pro nalezení horní úrovně řezné rychlosti se použil nástroj od spol. Sandvik Coromat s nastavením hodnoty tlaku na 75 [bar] (dolní úroveň tlaku), jelikož se jednalo o potenciálně nejslabší variantu (dolní úroveň tlaku, přívod řezné kapaliny pouze na čelo VBD). Hledání probíhalo způsobem, kdy byl pro nastavenou řeznou rychlost proveden jeden soustružený přejezd o délce 100 mm . Kritériem pro stanovení horní úrovně řezné rychlosti byla použitelnost VBD pro další soustružený přejezd, čili nedošlo během prvních 100 mm k destrukci břitu. Toto kritérium bylo splněno při řezné rychlosti $v_c = 130 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$.

Na obr. 40 je vidět VBD, u níž došlo ke stržení řezné hrany při vyšší řezné rychlosti. Tato VBD nemohla být použita pro další soustružený přejezd, jelikož nespĺnila stanovené kritérium.



Obrázek 40 – destrukce břitu vzniklá při hledání horní úrovně řezné rychlosti

Vzhledem k tomu, že každý pokus byl opakován pouze jednou, lze brát výsledky tohoto experimentu jako vstupní podklad pro budoucí detailnější zkoumání. Podle výsledků demonstrovaných na obr. 41 lze předpokládat, že se zvyšující se řeznou rychlostí se rozdíl mezi danými technologickými variantami zmenšuje. Velmi významného rozdílu bylo dosaženo při hodnotě řezné rychlosti $v_c = 110$ [m.min⁻¹]. Konvenční nástroj od spol. Sandvik Coromat vydržel v řezu 2,88 minut, kdežto prototypový nástroj RTI zvládl 4,86 min, což je o 69 % delší životnost. Při hodnotě řezné rychlosti $v_c = 130$ [m.min⁻¹] to bylo 2,27 min vs. 2,98 min, což je o 31 % delší životnost.



Obrázek 41 – porovnání životnosti nástrojů jednotlivých technolog. variant při zvýšených řezných rychlostech

Závěrečné shrnutí

- řeznou rychlost (v_c) lze prohlásit za nejvýznamnější faktor ovlivňující životnost nástroje
- se zvyšující se řeznou rychlostí byla mnohem horší předvídatelnost průběhu opotřebení – větší pravděpodobnost skokových změn
- vyšší tlak řezné kapaliny o hodnotě 100 [bar] při $v_c = 130$ [m.min⁻¹] nebyl dostatečný pro redukci generovaného tepla vznikajícího při tlaku 75 [bar] a $v_c = 110$ [m.min⁻¹]
- prototypový nástroj RTI se na horní úrovni faktorů ($p = 100$ [bar]; $v_c = 130$ [m.min⁻¹]) svou životností přibližně rovnal nástroji od spol. Sandvik Coromat na dolní úrovni faktorů ($p = 75$ [bar]; $v_c = 110$ [m.min⁻¹]) – tento fakt lze přičíst využití chlazení na hřbet VBD u prototypového RTI nástroje

Závěr

Výsledky studií, které se v minulosti zabývaly zkoumáním vlivu tlaku řezné kapaliny při hrubovacím soustružení slitiny Ti-6Al-4V na životnost nástroje, jasně dokázaly, že dostatečný tlak a správné směřování řezné kapaliny dokáže výrazným způsobem navýšit životnost nástroje. Obrábění materiálu Ti-6Al-4V za asistence vysokotlakého chlazení pomáhá redukovat teplo vzniklé při řezání, které je v tomto případě z velké části absorbováno nástrojem. Tento fakt je dán velmi špatnou tepelnou vodivostí obráběného materiálu.

V současné době je ve společnosti PCC pro zmíněný typ soustružnické operace používán komerčně dostupný nástroj od společnosti Sandvik Coromat. Tento nástroj využívající kruhovou VBD disponuje možností chladit pouze čelo břitu. Na základě mikroskopického zkoumání opotřebovaných VBD (vyřazené VBD po hrubovacích operacích Ti-6Al-4V) byla zjištěna skutečnost, že stěžejní místo opotřebení je na hřbetní části destičky. Snahou nově navrženého nástroje proto bylo vytvořit kombinovaný systém přívodu řezné kapaliny a redukovat tak opotřebení na hřbetní straně destičky, a dále pak zkrátit vzdálenost mezi výstupem řezné kapaliny na čelní straně břitu. Technologií 3D tisku byly vytvořeny čelní a hřbetní upínky s kanálky pro přívod a výstup řezné kapaliny realizovaný vnitřkem nástroje. Při rešeršní činnosti nebyl nalezen nástroj, který by nabízel tuto kombinovanou formu přívodu řezné kapaliny za použití kruhové VBD, proto se jedná o unikátní prototypový model.

Po návrhu a výrobě prototypového nástroje bylo přistoupeno k samostatnému experimentálnímu ověření, které spočívalo v hrubovacím podélném soustružení kruhové tyče z materiálu Ti-6Al-4V.

Z výsledků je patrné, že vliv tlaku a směřování řezné kapaliny je značný. Z námi sledovaných parametrů byl největší přínos očekáván od vysokotlakého chlazení, tak jak uvádějí studie v úvodu práce. Zde se však dominantní vliv prokázat nepodařilo. Mnohem markantnější vliv mělo směřování chlazení, a to zejména na hřbetní stranu VBD. Díky optimalizaci provedené na prototypovém nástroji bylo dosaženo navýšení životnosti o již zmíněných 26 % (viz oddíl 5.1.3 *Vyhodnocení experimentu, Závěrečné shrnutí* na str. 41). Tento fakt se potvrdil i při zvyšování řezné rychlosti, neboť testovaný komerční nástroj, který nedisponoval chlazením na hřbetu, měl při zvýšených řezných rychlostech o 69 % ($v_c = 110 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $p = 75 \text{ bar}$) a 31 % ($v_c = 130 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $p = 100 \text{ bar}$) menší životnost (viz oddíl 5.2.3 *Vyhodnocení experimentu* na str. 44).

Samotný vliv tlaku řezné kapaliny je významný zejména pro tvorbu třísky, která je vlivem jeho vysokých hodnot článkovitá. Dalším benefitem je poskytnutí lepší předvídatelnosti opotřebení nástroje. Zde dochází vlivem vysokého tlaku k výrazně rovnoměrnějšímu opotřebení VBD, a to až do kritické hodnoty. Ve výsledku je možné lépe řídit výrobu z pohledu jakosti a spolehlivosti.

Z poznatků získaných během psaní této práce je více než jasné, že potenciál v oblasti designování chladicích systémů pro obráběcí nástroje určené pro opracovávání zejména exotických materiálů je vysoký. Nabízí se možnost téma dále rozvinout o nasazení technologie na typově jiný soustružnický nástroj, který by umožňoval provádět odlišné soustružnické operace.

Použité zdroje

- [1] EZUGWU, E. O., J. BONNEY, R. B. DA SILVA, A. R. MACHADO a E. UGWOHA. High Productivity Rough Turning of Ti-6Al-4V Alloy, with Flood and High-Pressure Cooling. *Tribology Transactions* [online]. 2009, 52(3), 395-400 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1080/10402000802687866. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402000802687866>
- [2] ÇOLAK, Oğuz. Optimization of Machining Performance in High-Pressure Assisted Turning of Ti6Al4V Alloy. *Strojníški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2014, 60(10), 675-681 [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.5545/sv-jme.2013.1079. ISSN 00392480. Dostupné z: <http://www.sv-jme.eu/article/optimization-of-machining-performance-in-high-pressure-assisted-turning-of-ti6al4v-alloy/>
- [3] *Sandvik Coromat: Použití řezné kapaliny a chlazení při soustružení* [online]. [cit. 2020-7-03]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning.aspx>
- [4] *MM Průmyslové spektrum: Bodově přesný paprsek chladicího média* [online]. [cit. 2020-7-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/bodove-presny-paprsek-chladiciho-media.html>
- [5] *MM Průmyslové spektrum: Rozhodující je použití efektivního chlazení* [online]. [cit. 2020-7-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/bodove-presny-paprsek-chladiciho-media.html>
- [6] *Sandvik Coromat: Aspekty použití řezné kapaliny – obrábění s použitím řezné kapaliny* [online]. [cit. 2020-7-03]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/pages/coolant.aspx>
- [7] ŠINDELÁŘ, Ondřej. *Dokončovací soustružení titanových slitin*. Plzeň, 2018. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Jan Matějka.
- [8] VYŠATA, Jiří. *Strojírenská technologie obrábění: Základy obrábění – tvoření třísky, charakteristiky, jevy* [online] [cit. 2020-16.5.] Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Nikl_titan.pdf
- [9] GURNÍK, Ondřej. *Efektivní obrábění titanové slitiny nástroji s rektifikovaným ostřím* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/137060/GUR0032_FS_B2341_2303R002_2019.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

- [10] *Iscar: Iscar tool advisor* [online]. [cit. 2020-3-03]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/ita/>
- [11] *Iscar: eCatalog* [online]. [cit. 2020-3-03]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/MoreInfo.aspx?mapp=IS&fnum=493&app=0&isoD=-1>
- [12] *Iscar: Katalog – nerotační nástroje* [online]. [cit. 2020-3-03]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/Catalogs/publication-2019/nonrotating-tools-2019-iso-turn-tools-6.pdf>
- [13] *Iscar: eKatalog* [online]. [cit. 2020-3-03]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=3603194&fnum=3168&mapp=IS&GFSTYP=M&srch=1>
- [14] *Iscar: eCatalog* [online]. [cit. 2020-3-03]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=3605959&fnum=3815&mapp=TG&app=0&GFSTYP=M&isoD=1>
- [15] *Walter: Walter GPS 6.2.5.* [online] [cit. 2020-3-03]. Dostupné z: <https://gps.walter-tools.com/touchtime/walter/?ProductArea=1OiYiI4e%2bMpHtLT%2btFOuNg%3d%3d&Language=A5PuYOpDs59S1j%2fuSQUbqA%3d%3d&UnitSystem=eWpJOfQyZGdifwL7TJuRCQ%3d%3d&MaterialID=&ToolSelectorMode=1Yw1uHu6mcVPz8u2QLoRuQ%3d%3d&CustomerID=dfdISf9ika9IW3U1eDog%2bA%3d%3d&UserID=dfdISf9ika9IW3U1eDog%2bA%3d%3d&IsDebugMode=ppjhXuAQzd8y%2fdBW9B7jWQ%3d%3d&SiteCountryCode=TkuMaFEE2YZmnpHsmj4F9g%3d%3d&EmbeddedInSharepoint=i4U5x1B9bLT%2bptoUCJuU6Q%3d%3d&CurrentDateTime=vCI%2fFiFaqIoHCgPk3GyipZ%2be4hi9G17vJKQDPfu4RQk%3d%3d&OrderCodesStandard=CCAW2xgVDZmLPsq7d3VAMA%3d%3d&OrderCodeURLToCall=jjVpYhWurP6TABSHhgt581jncguKlmGv8GOi6qllJyVmLvUZAdJLuGKxGrwOIbjYHZh3NNPgsCsuf09cXvFsKZt1Acbts71p0JwaToxhTg%3d%3d&CartItemParameter=M%2bMKZTuYiKjg1wj1E54ieg%3d%3d&AssignedUserRoles=dfdISf9ika9IW3U1eDog%2bA%3d%3d&TIBPID=dEfDgI4ZqxavHbhq0l1o1g%3d%3d#/trs/quickSearch>
- [16] *Walter: eKatalog.* [online] [cit. 2020-3-03]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/cs-cz/search/pages/default.aspx#/product/SNMG190616-NRT%20WS10>
- [17] *Walter: eKatalog.* [online] [cit. 2020-3-03]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/en-us/search/pages/default.aspx?m=5672918#/product/C6-DSDNN-00070-19>
- [18] *Sandvik Coromat: C5-SRDCN00060-12AHPA* [online] [cit. 2020-3-03]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=c5-srdcn00060-12ahpa>

- [19] Elektronická učebnice: Soustružnické nože [online] [cit. 2020-9-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1219>
- [20] Tips film: Grooving - trochoidal turning [online] [cit. 2020-5-05]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=sJnQnsz0cN8>
- [21] FOREJT, Milan., PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226s. ISBN 80-214-2374-9.
- [22] Iscar: *Obrábění titanu – řešení pro lékařský průmysl* [online] [cit. 2020-20-05] Dostupné z: <https://www.iscar.cz/Media/pdf/ObrabenTitanuProLekarskyPrumysl.pdf>
- [23] Iscar: *e-katalog – RCMT 1204-MO* [online] [cit. 2020-1-05] Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=5500620&fnum=310&mapp=IS&lang=WZ>
- [24] Blasser – SWISSLUBE [online] [cit. 2020-21-04] Dostupné z: https://www.blaser.com/en_CZ

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 - konvenční přívod řezné kapaliny pomocí stavitelné trysky [6].....	6
Obrázek 2 – přesný přívod řezné kapaliny na čelo VBD [6]	7
Obrázek 3 – přesný vysokotlaký přívod vytvářející hydraulický klín [3].....	7
Obrázek 4 – různé způsoby vyústění řezné kapaliny na čelní část VBD [6]	8
Obrázek 5 – kombinovaný přívod řezné kapaliny	9
Obrázek 6 – oblasti reprezentující vhodný způsob přívodu řez. kapaliny na základ. hloubky řezu a posuvu.....	10
Obrázek 7 - výhody přívodu řezné kapaliny z horní a ze spodní strany při obrábění různých typů mat. [3]	10
Obrázek 8 – vliv snížení průřezu kanálku na rychlost proudění kapaliny [6].....	12
Obrázek 9 – porovnání závislosti počtu a průměru trysek na průtokovém množství média [6]	12
Obrázek 10 – mechanismus tvorby nárůstku [8].....	16
Obrázek 11 – rozklad tepla v různých částech segmentové třísky a) $vc = 60 [m.min^{-1}]$, b) $vc = 60 [m.min^{-1}]$ [9].....	16
Obrázek 12 – VBD typu WNMG 080412 – PP [11].....	18
Obrázek 13 – pozitivní geometrie utvařeče třísek označená jako PP [12].....	18
Obrázek 14 – držák PWLNR 2525M-08-JHP uzpůsobený pro vysokotlaký přívod řezné kapaliny na čelo VBD [13].....	19
Obrázek 15 – držák PWLNR 2525X-08X-JHP-MC uzpůsobený pro kombinovaný přívod řezné kapaliny na VBD [14].....	19
Obrázek 16 – VBD typu SNMG190616-NRT WS10 [16]	20
Obrázek 17 - držák typu C6-DSDNN-00070-19 [17]	20
Obrázek 18 – používaný nástroj ve spol. PCC typu C5 SRDCN-12HPA od společnosti Sandvik [18]	21
Obrázek 19 – význam jednotlivých písmen ve značení nástroje [19].....	21
Obrázek 20 – znázornění přívodu řezné kapaliny vnitřkem nástroje [18]	22
Obrázek 21 – konvenční (nahore) a trochoidní (dole) metoda soustružení [20].....	23
Obrázek 22 – tělo prototypového nástroje vyrobeného v RTI ZČU	25
Obrázek 23 – připravený polotovar na výrobu nástroje upevněný v prostorách frézky	26
Obrázek 24 – soustava kanálků a upínek pro přívod řezné kapaliny	27
Obrázek 25 – přímá varianta čelní upínky	28
Obrázek 26 – varianta čelní upínky s vývodem řezné kapaliny pod úhlem 18°	28
Obrázek 27 – upínka pro přívod řezného média na hřbet VBD.....	28
Obrázek 28 – ISO značení VBD [19].....	29

Obrázek 29 – ilustrační obrázek VBD typu RCMT 1204MO–MK	29
Obrázek 30 – upnutý polotovar připravený k obrábění.....	32
Obrázek 31 – optický mikroskop Keyence VHX 6000 používaný pro zjišťování hodnot	34
Obrázek 32 – snímek z optického mikroskopu Keyence VHX 6000 včetně zanesené hodnoty opotřebení $VB_{\max} = 0,13$ [mm].....	35
Obrázek 33 – časový průběh opotřebení při použití prototypového nástroje při vysokotlakém kombinovaném přívodu řezné kapaliny	37
Obrázek 34 - časový průběh opotřebení při použití komerčního nástroje při vysokotlakém kombinovaném přívodu řezné kapaliny	38
Obrázek 35 – rozdílnost opotřebení u různých technolog. variant po prvotním soustruženém přejezdu	38
Obrázek 36 – hrubá chyba vzniklá při 2. opakování 1. pokusu	39
Obrázek 37 – neplatné opakování vlivem hrubé chyby vzniklé při odečítání VB_{\max}	40
Obrázek 38 – průměrné životnosti nástrojů jednotlivých technologických variant.....	41
Obrázek 39 – časový průběh opotřebení pro jednotlivé řezné rychlosti [21]	42
Obrázek 40 – destrukce břitu vzniklá při hledání horní úrovně řezné rychlosti	44
Obrázek 41 – porovnání životnosti nástrojů jednotlivých technolog. variant při zvýšených řezných rychlostech.....	45
Tabulka 1 – chemické složení slitiny Ti-6Al-4V [7]	14
Tabulka 2 – mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [7].....	14
Tabulka 3 – faktory a jejich úrovně.....	33
Tabulka 4 – plán experimentu	33
Tabulka 5 – příklad záznamu hodnot časů v řezu a opotřebení pro pokus č. 6 a jeho opakování	36
Tabulka 6 – faktory a jejich úrovně.....	43
Tabulka 7 – plán experimentu	43

Přílohy

Vázané přílohy

Příloha č. 1 – Specifikace strojního vybavení použitého při experimentální činnosti

Příloha č. 1 – Grafická interpretace výsledků experimentálního porovnání životnosti nástrojů včetně mikroskopických snímků

PŘÍLOHA č. 1

Specifikace strojního vybavení použitého při experimentální činnosti

CTX beta 1250 TC

		CTX beta 1250 TC (<i>linear</i>)
Max. Turning length	mm	1,200
Max. Turning diameter (Disk/Chain magazine)	mm	∅ 470/500
Turning-milling spindle/speed	rpm	12,000
Torque/power (40 % DC)	Nm/kW	120/22.5
Tool magazine	Stations	24 (max. 80)
X/Y/Z Stroke travelling column slide	mm	490/±125/1,300
Main spindle/speed	rpm	ISM 76/5,000
Torque/power (40 % DC)	Nm/kW	360/32
Counter spindle (optional)/speed	rpm	ISM 76/5,000
Torque/power (40 % DC)	Nm/kW	360/32
Footprint incl. chip conveyor	m ²	12.1

HIGHLIGHTS

- + **Highest milling performance with the compactMASTER**
with 120 Nm and up to 20,000 rpm (12,000 rpm as standard)
- + **Up to 300 mm Y-stroke** for the excentric machining
based on travelling column concept with maximum stability
- + **6-sided complete machining** with main spindle
and optional counter spindle up to 700 Nm
- + **Bar machining up to ∅104 mm,**
chuck up to ∅400 mm



zdroj:

<https://cz.dmgmori.com/resource/blob/129436/59902b938b6c75eee58ed9c2b5aad292/pt0uk-ctx-tc-pdf-data.pdf>

Zoller Genius 3S

Univerzální měřicí stroj ZOLLER

V326007

»genius 3s - pilot 3.0«

»genius 3s« je high-end měřicí stroj pro všechny druhy nástrojů pro třískové obrábění. Pět CNC řízených os umožňuje komplexní, precizní a plně automatické měření.



Univerzální měřicí stroj ZOLLER »genius 3s« s násvitovým měřením

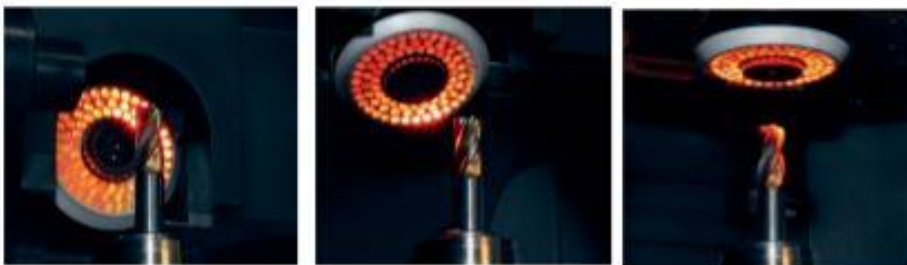
S přístrojem »genius 3s« změříte rychle, jednoduše a μ -přesně vnější konturu Vašich nástrojů – od manuální až po plně automatickou bezdotykovou kompletní kontrolu. Všechny naměřené výsledky se detailně dokumentují na protokolech a lze je stisknutím tlačítka kdykoliv přenášet do řídicích systémů brusek. Konkurencí nedostižné kamerové zpracování obrazu ZOLLER »pilot 3.0« je díky svému jednoduchému grafickému vzhledu pracovní plochy a zadávacích dialogů intuitivní pro obsluhu. Integrovaný informační systém nabízí funkci nápovědy ve všech oblastech zpracování obrazu. Široký výběr měřicích programů Vám umožňuje individuální přizpůsobení přístroje »genius 3s« přesně podle Vašich představ a požadavků.

Technická data:

- 5 CNC řízených os
- měřicí rozsah - osa Z: 600 mm
- měřicí rozsah - osa X: 175 mm
- měřicí rozsah - osa Y: ± 50 mm
- maximální průměr nástroje: 340 mm
- maximální délka nástroje pro axiální násvitové měření: 500 mm
- měřitelný průměr nástroje přejetím přes osu: 100 mm

Volitelný paket měřicích programů:

- měřicí programy »FORED Grind« (obj. č. 8701315 (viz leták))



Výklopná CCD kamera pro měření v násvitu umožňuje radiální a axiální měření (výklopná 0° až 90°)

zdroj:

<http://www.zoller.cz/wp-content/uploads/2014/04/genius-3s.pdf>

KEYENCE VHX 6000

Digitální mikroskop

- CMOS kamera se snímkovou frekvencí 50 fps (vyjímatelný objektiv)
- obraz s krátkou vlnovou délkou ve vysokém rozlišení HDR (16 bitů – 65 536 odstínů)
- až 20 000 x 20 000 pixelů
- eliminace projevů aberace
- odstranění kruhových odlesků
- automatická korekce nerovnoměrného jasu
- spojování 3D obrazu
- variabilní úhel osvětlení
- automatická hloubková kompozice
- pozorování pod jakýmkoliv úhlem
- 2D a 3D měření
- synchronní ovládání kamery
- posuvný mechanismus stojanu



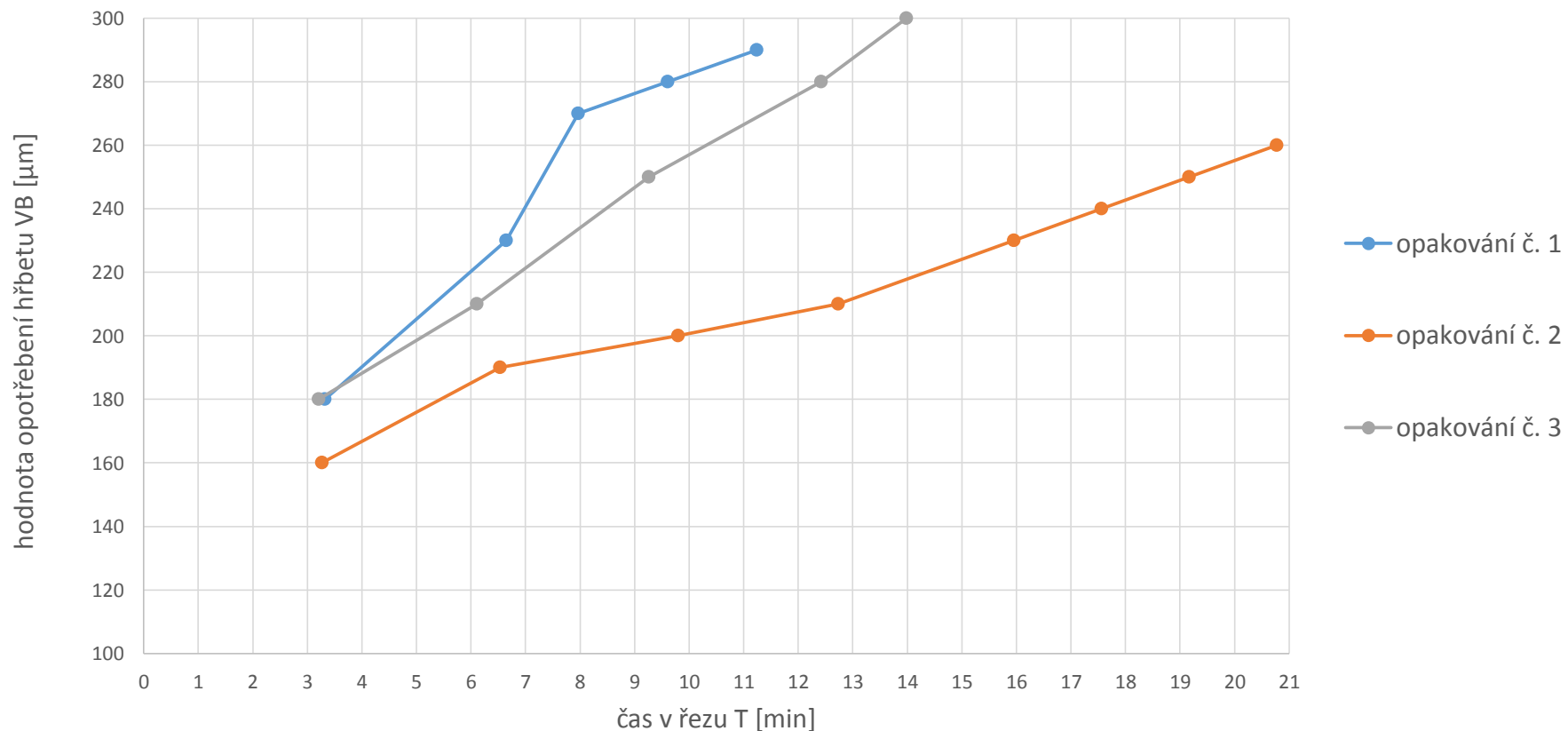
zdroj:

<https://www.keyence.eu/cscz/products/microscope/digital-microscope/vhx-6000/>

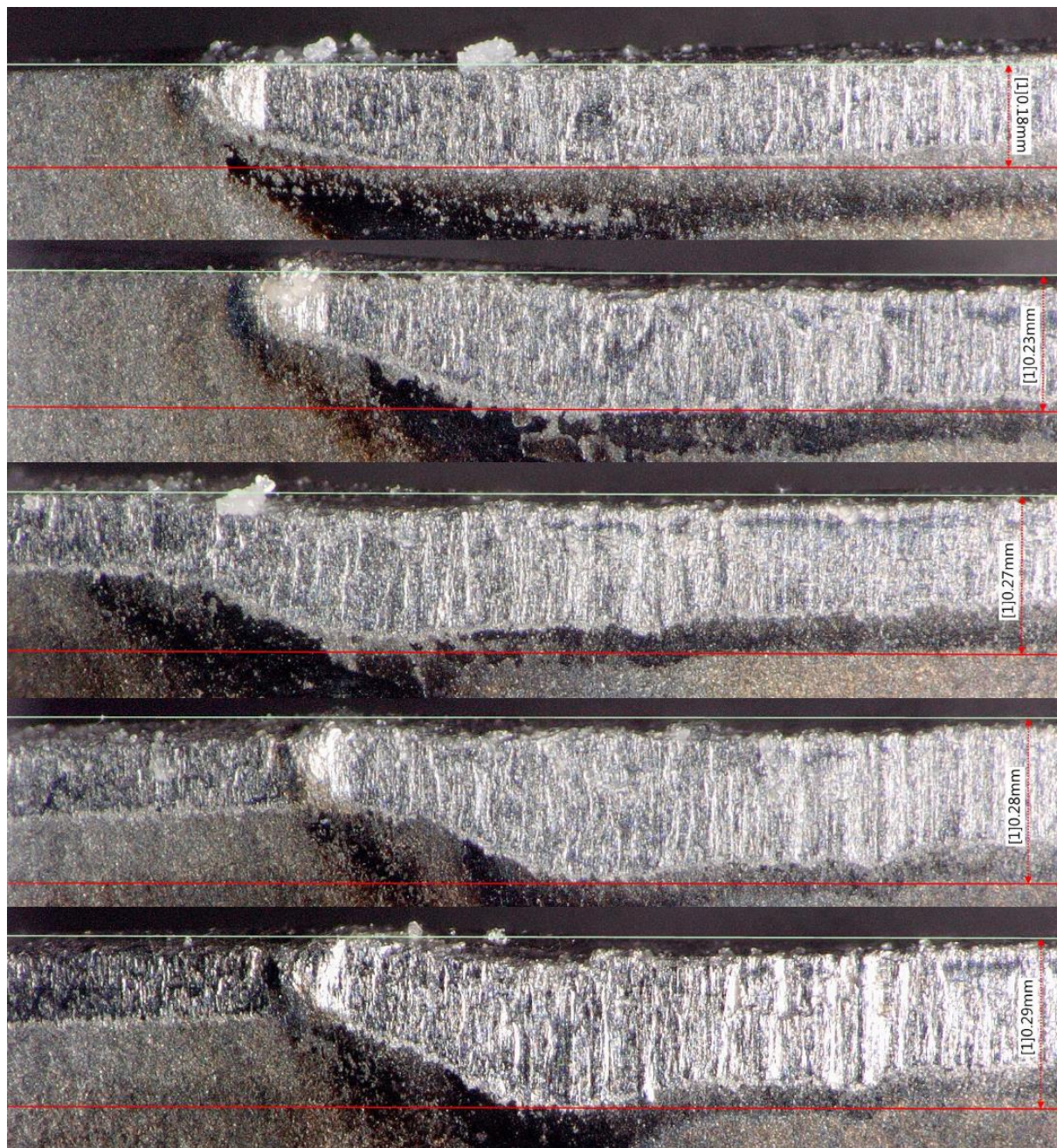
PŘÍLOHA č. 2

Grafická interpretace výsledků experimentálního porovnávání životnosti nástrojů včetně mikroskopických snímků

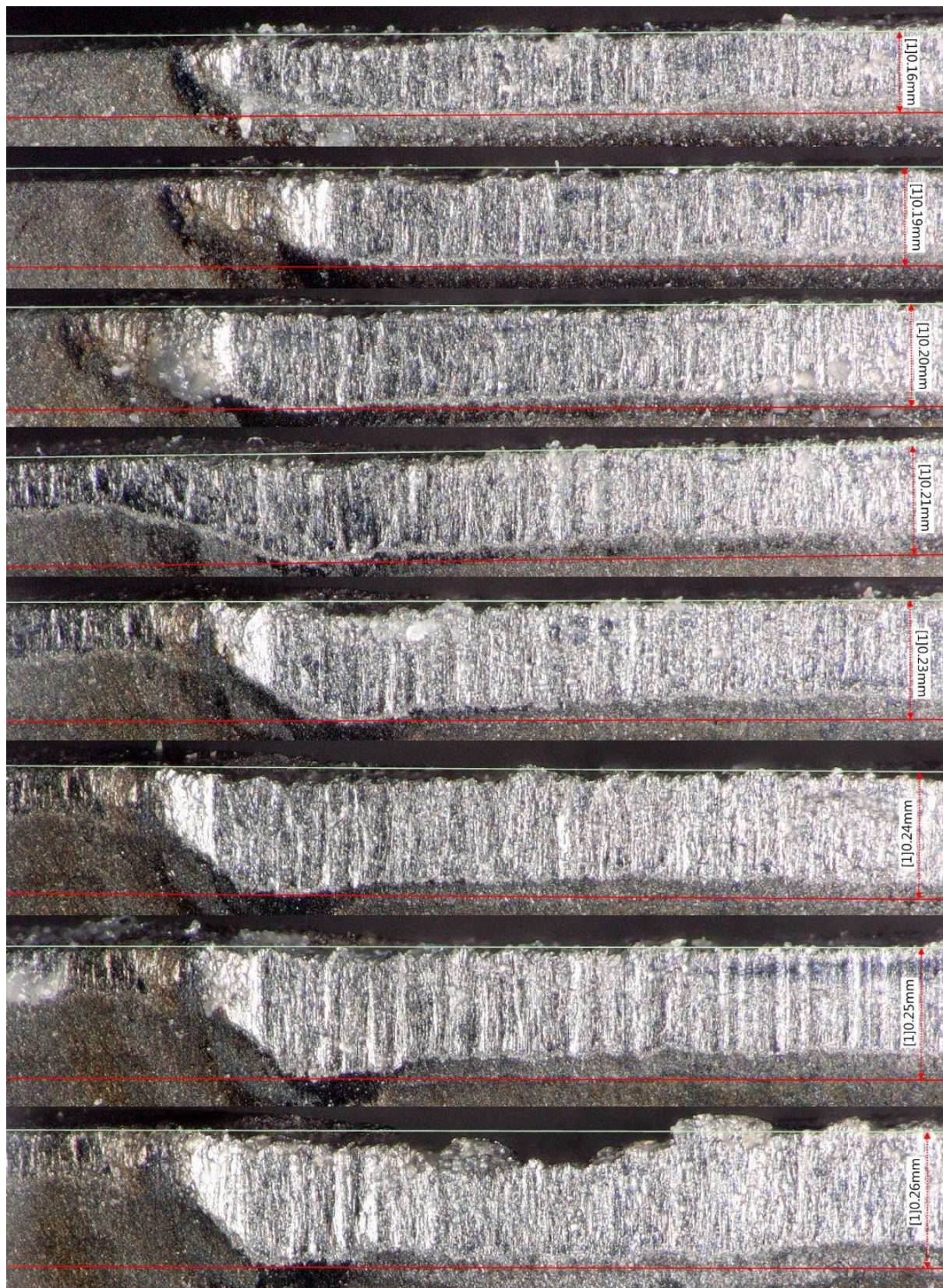
ZÁVISLOST OPOTŘEBENÍ HŘBETU VBD NA ČASE V ŘEZU
pokus č. 1: Sandvik - čelo - 20 bar



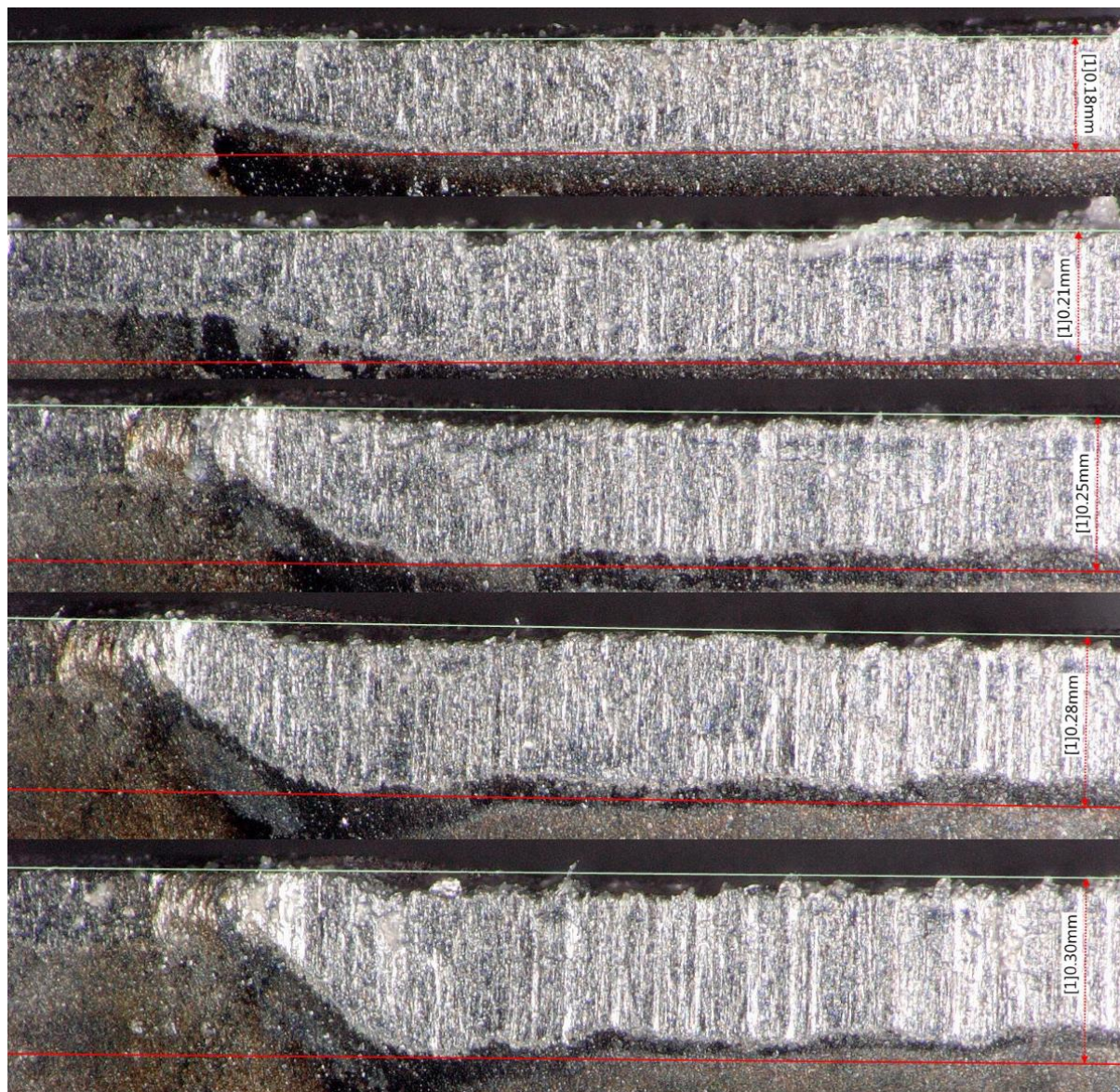
pokus č. 1 – opakování č. 1: Sandvik - čelo - 20 bar



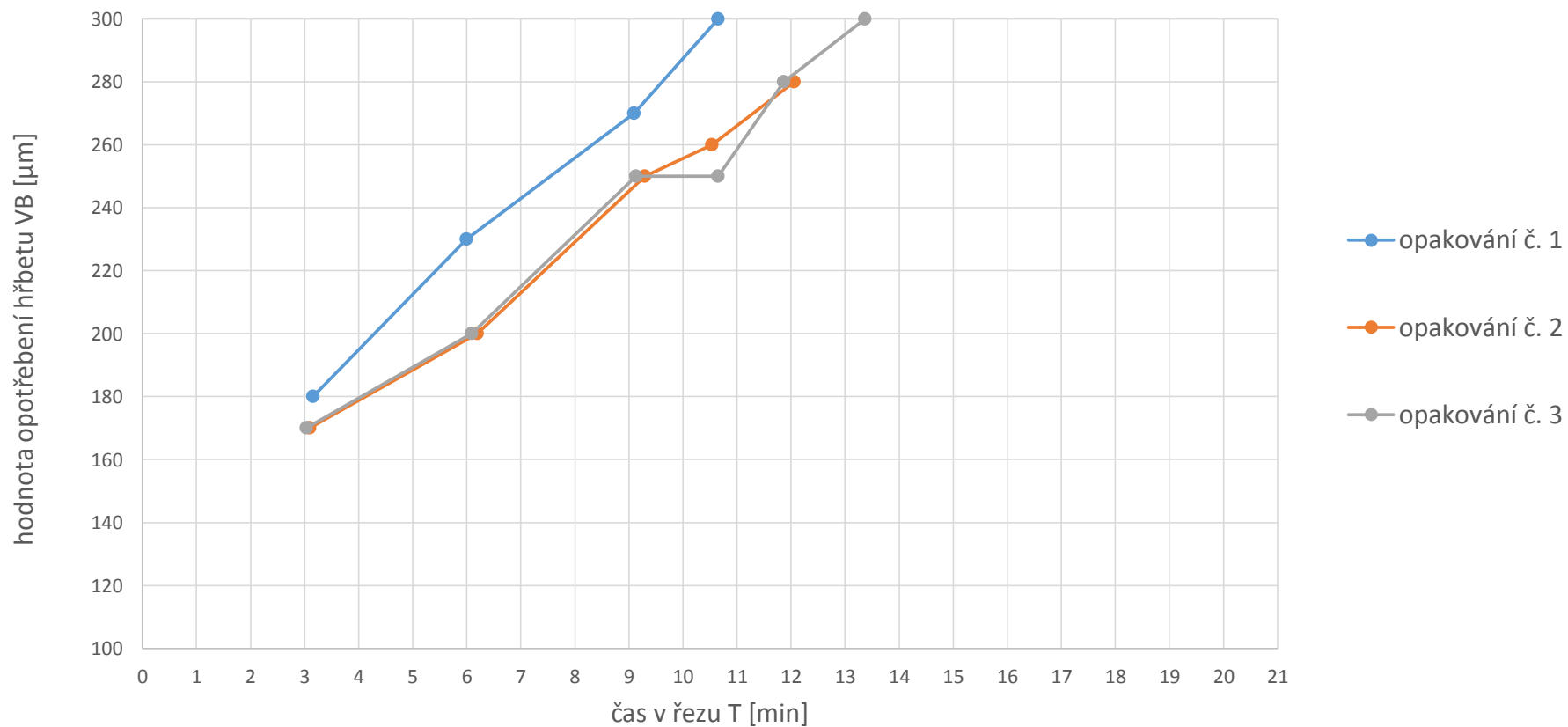
pokus č. 1 – opakování č. 2: Sandvik - čelo - 20 bar (hrubá chyba)



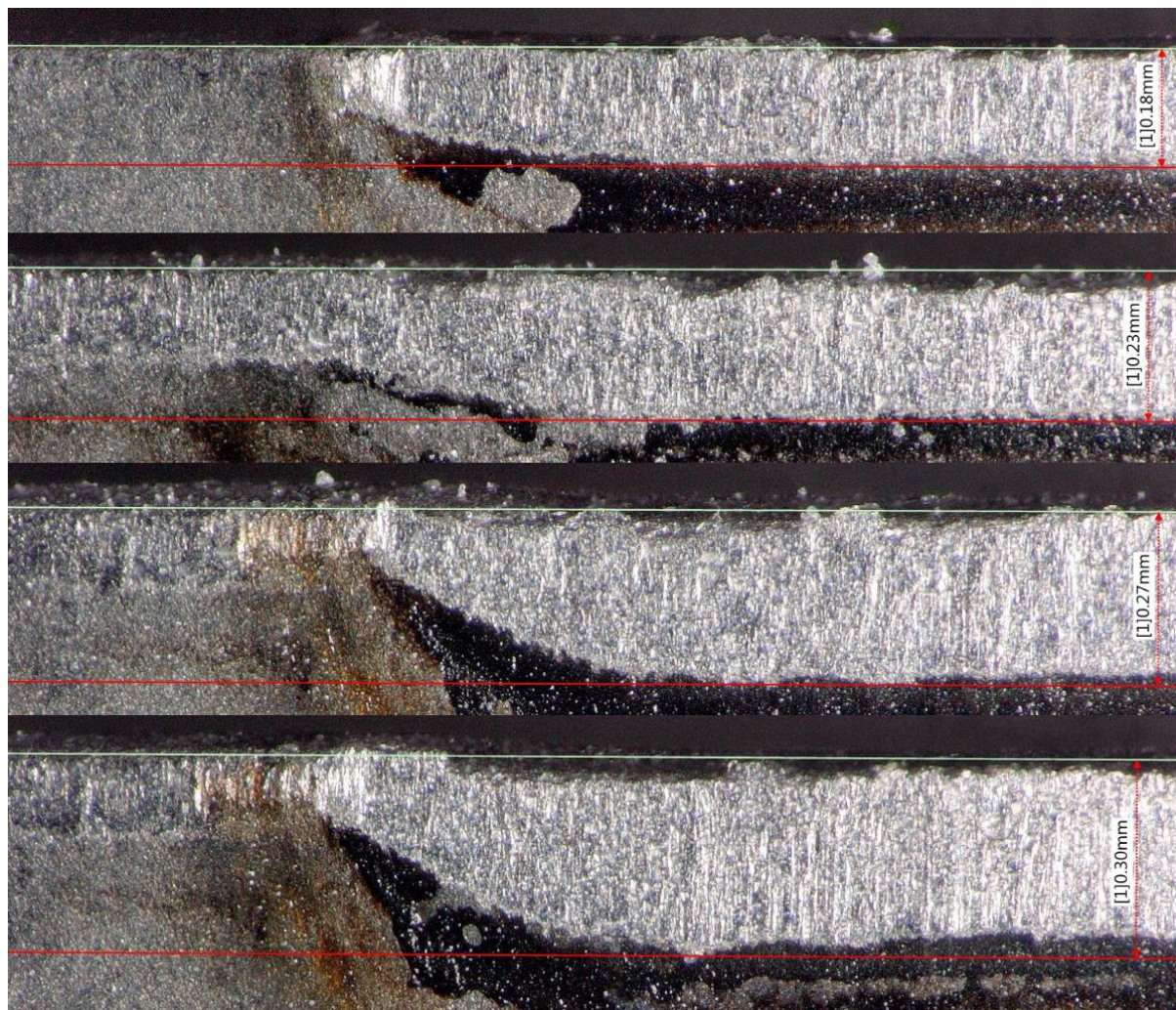
pokus č. 1 – opakování č. 3: Sandvik - čelo - 20 bar



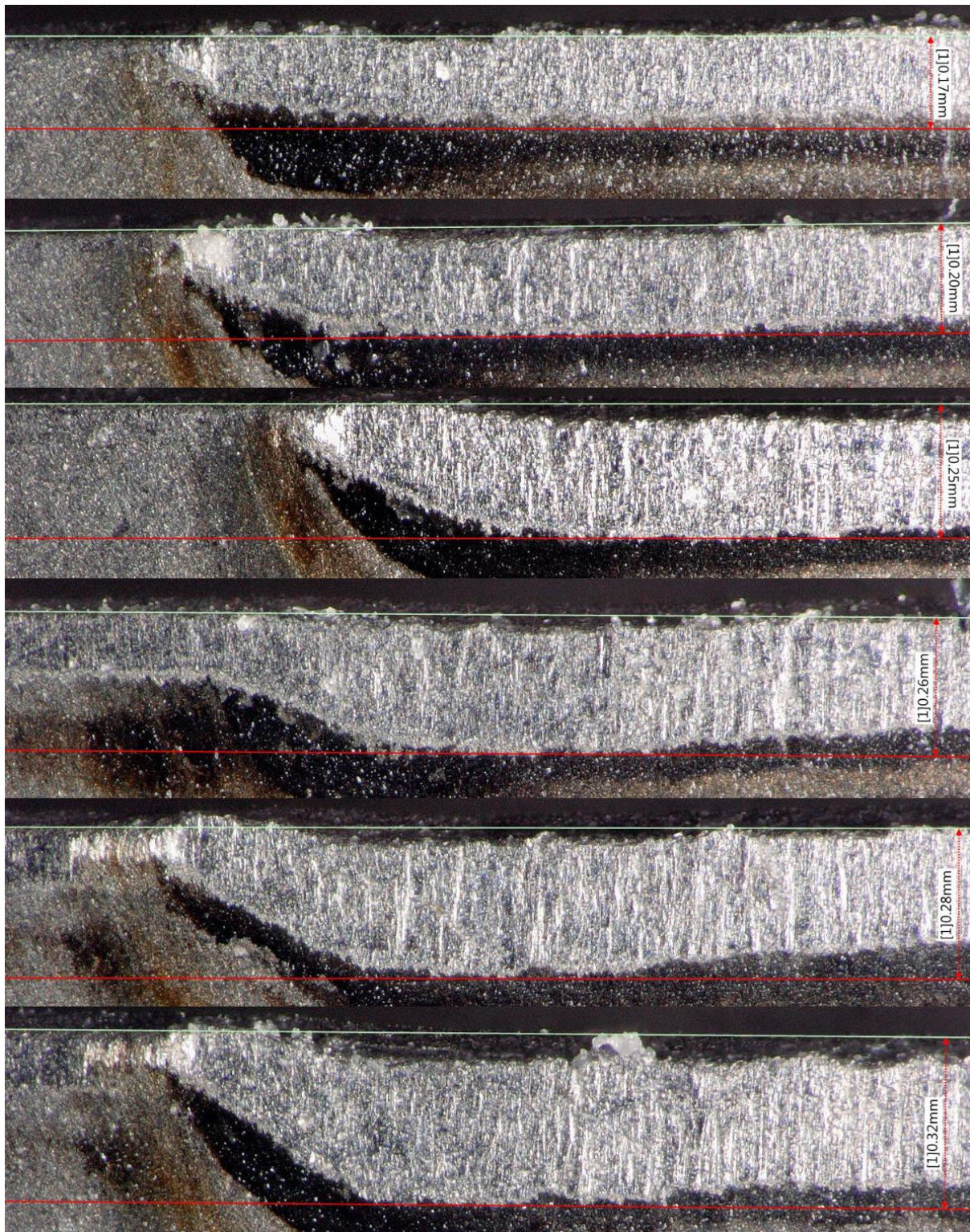
ZÁVISLOST OPOTŘEBENÍ HŘBETU VBD NA ČASE V ŘEZU pokus č. 2: Sandvik - čelo - 100 bar



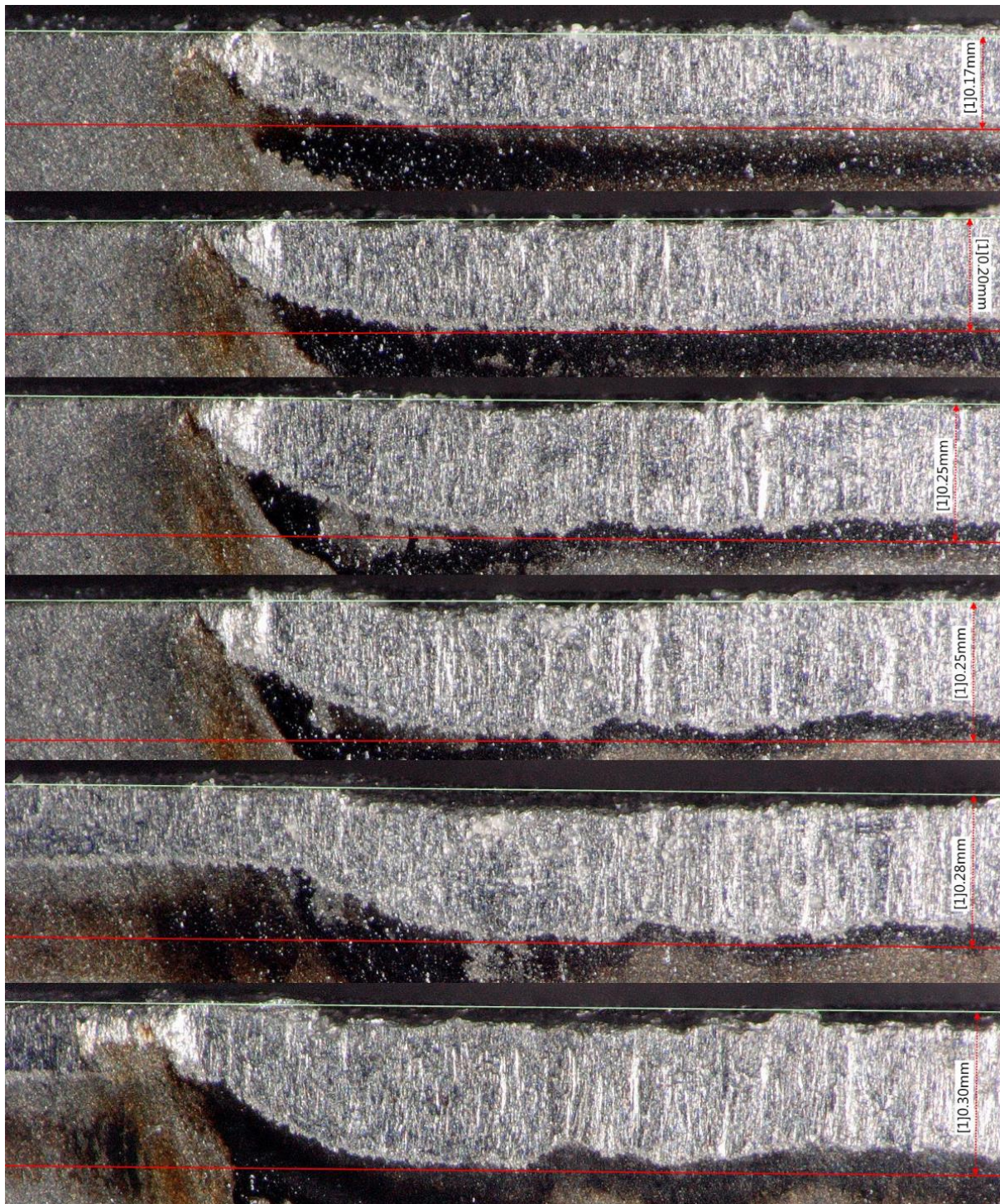
pokus č. 2 – opakování č. 1: Sandvik - čelo - 100 bar



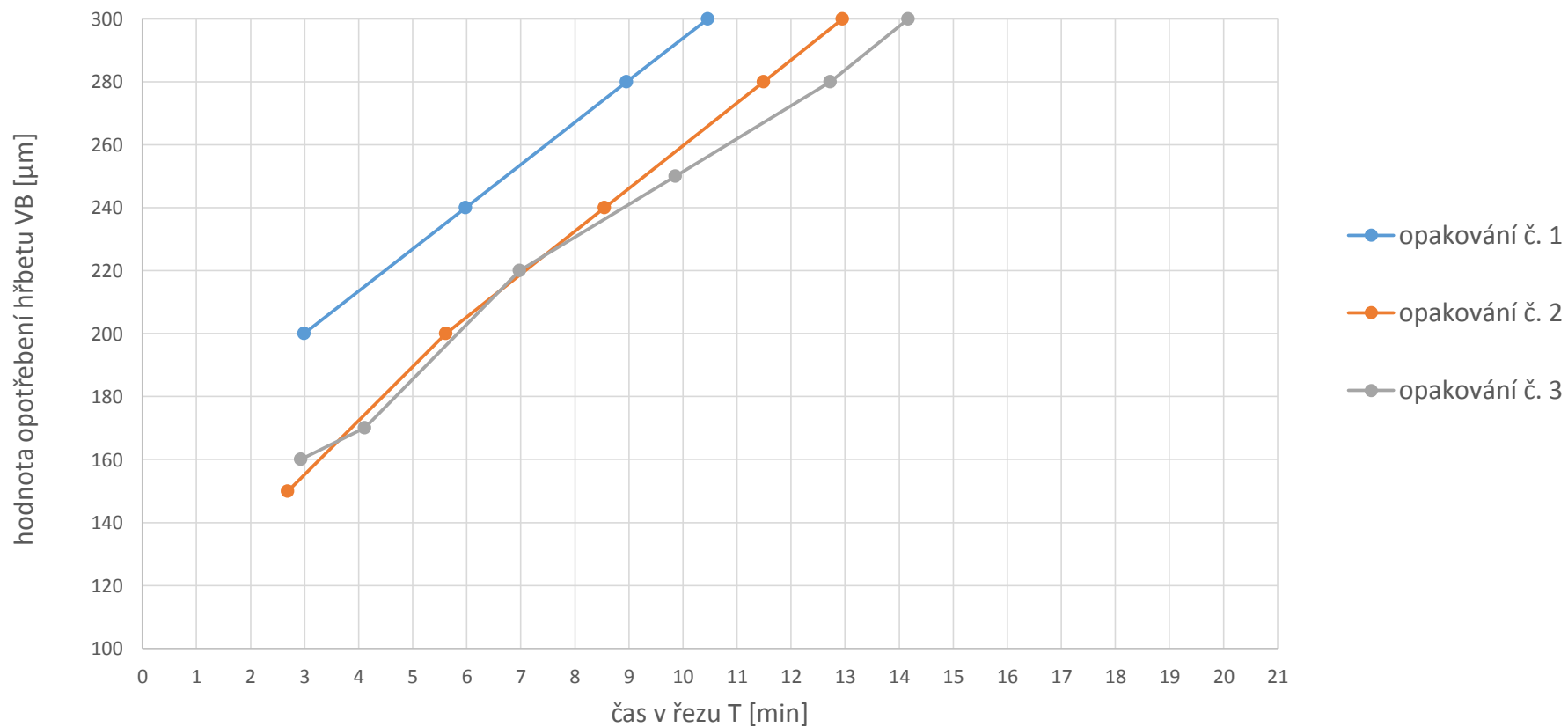
pokus č. 2 – opakování č. 2: Sandvik - čelo - 100 bar



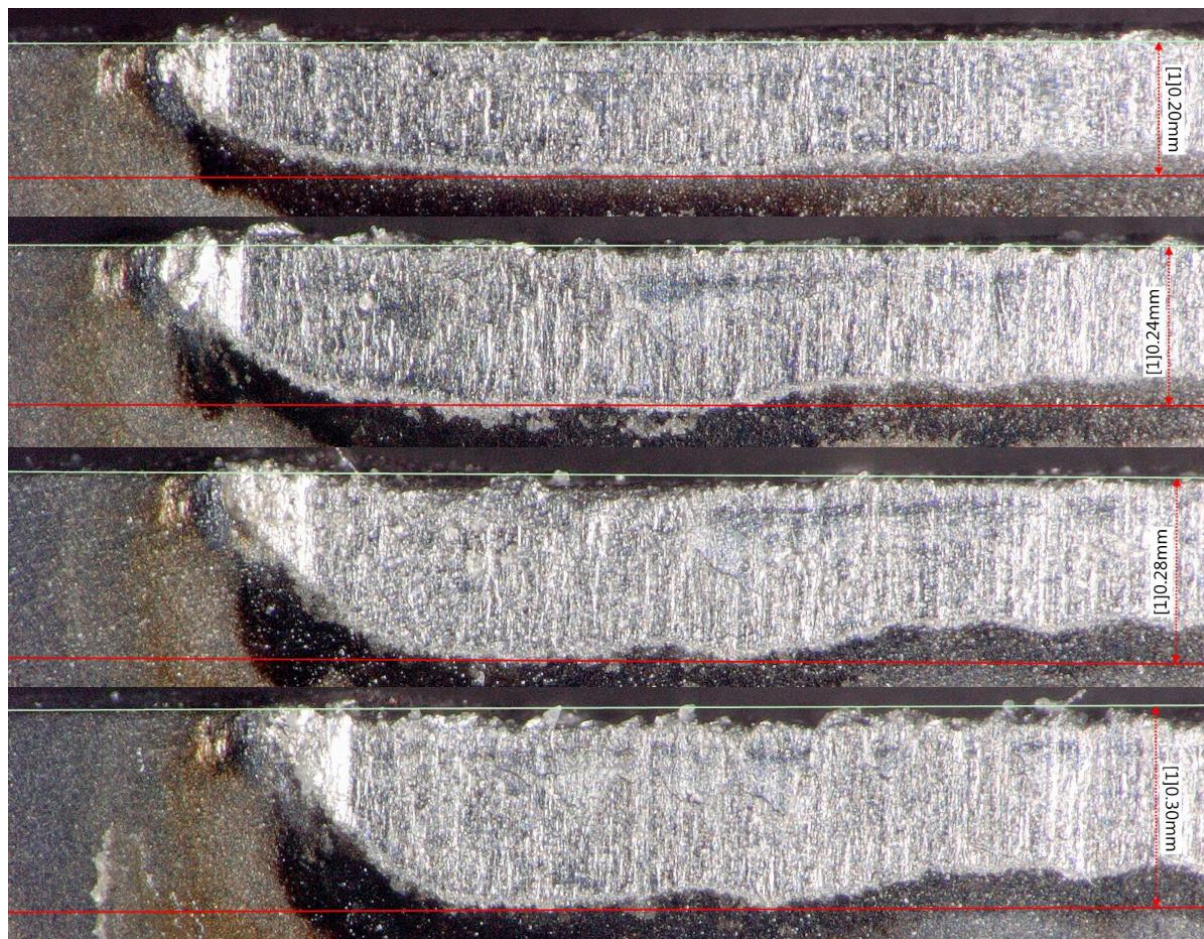
pokus č. 2 – opakování č. 3: Sandvik - čelo - 100 bar



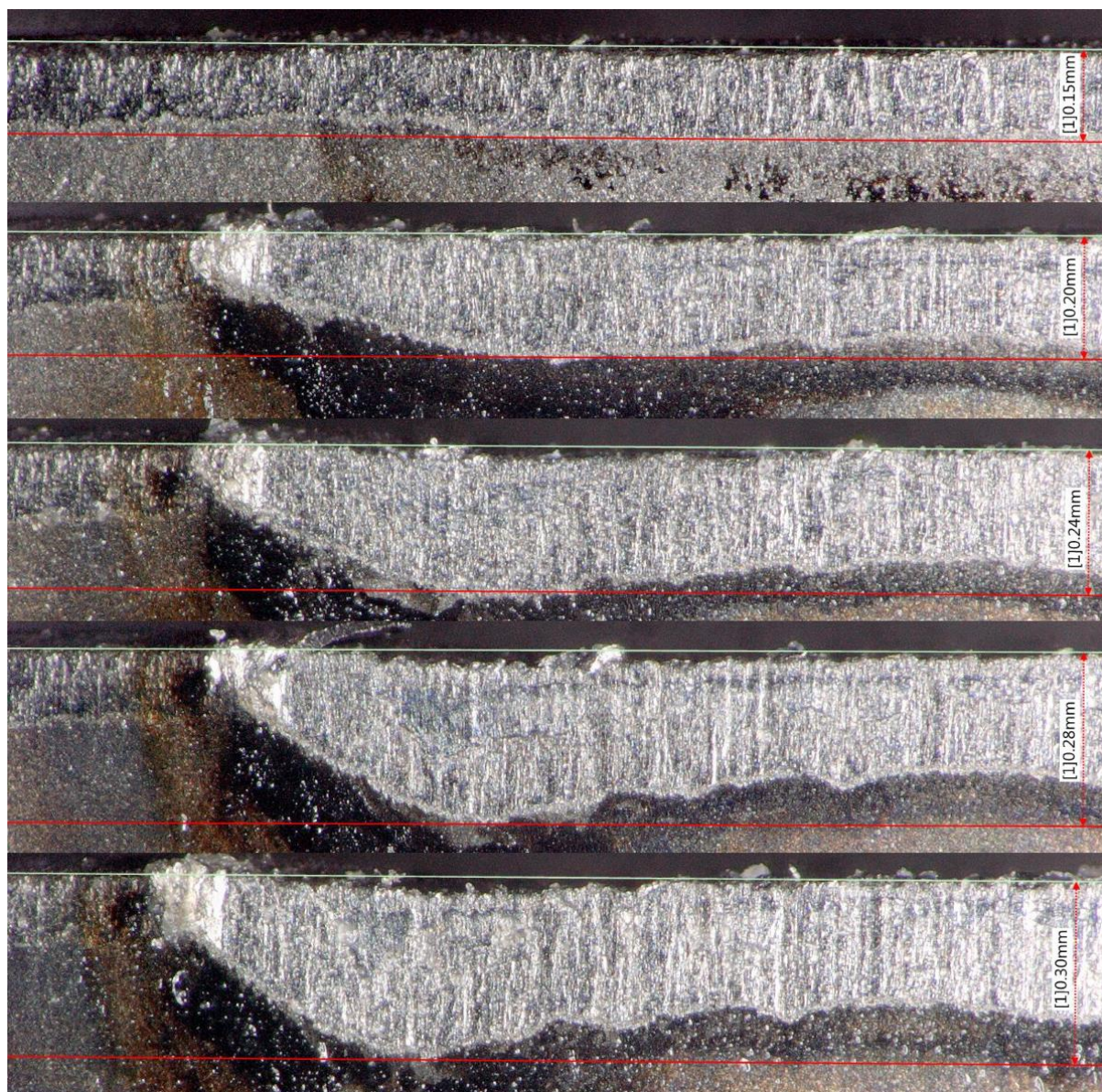
ZÁVISLOST OPOTŘEBENÍ HŘBETU VBD NA ČASE V ŘEZU pokus č. 3: prototyp RTI - čelo - 20 bar



pokus č. 3 – opakování č. 1: RTI - čelo - 20 bar



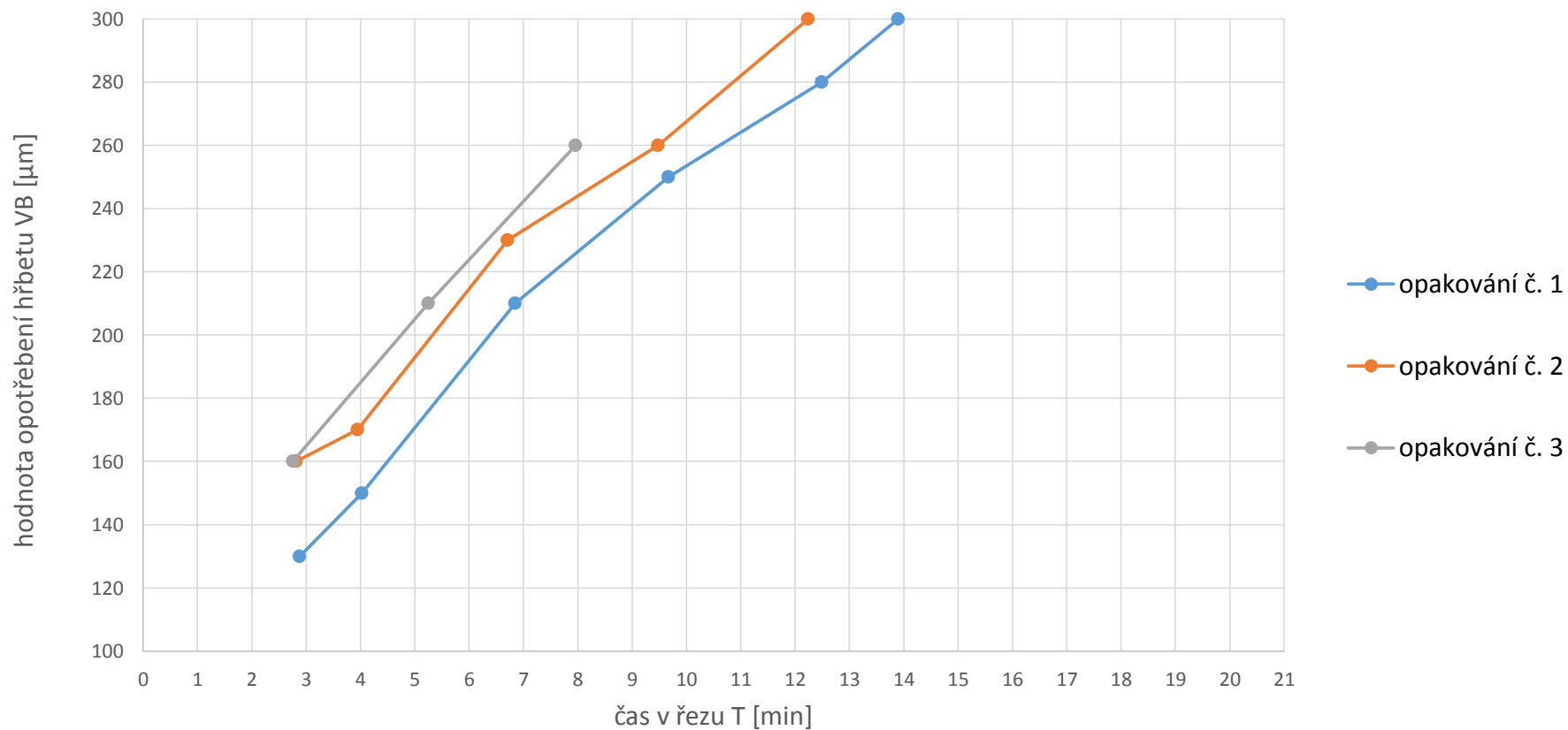
pokus č. 3 – opakování č. 2: RTI - čelo - 20 bar



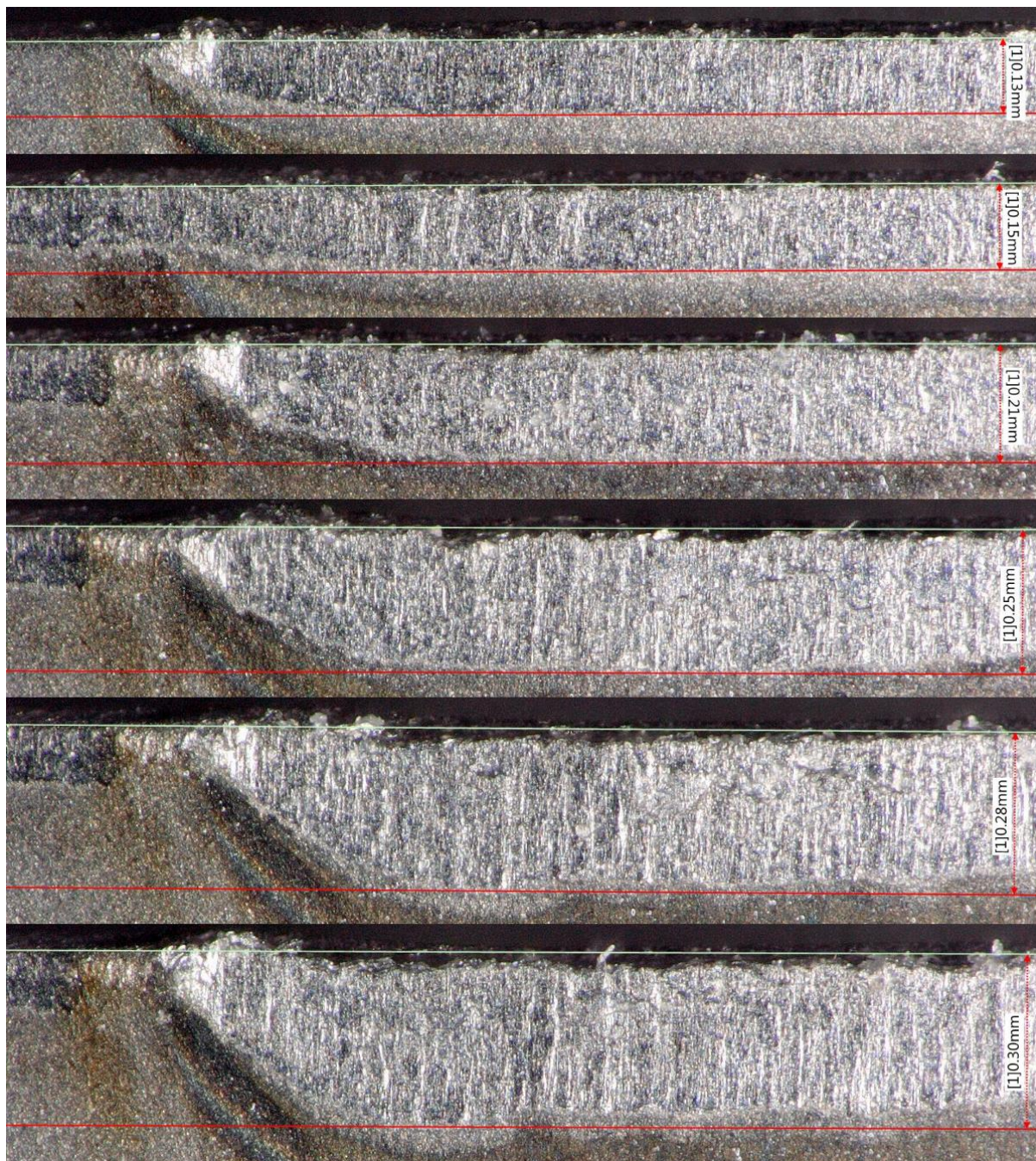
pokus č. 3 – opakování č. 3: RTI - čelo - 20 bar



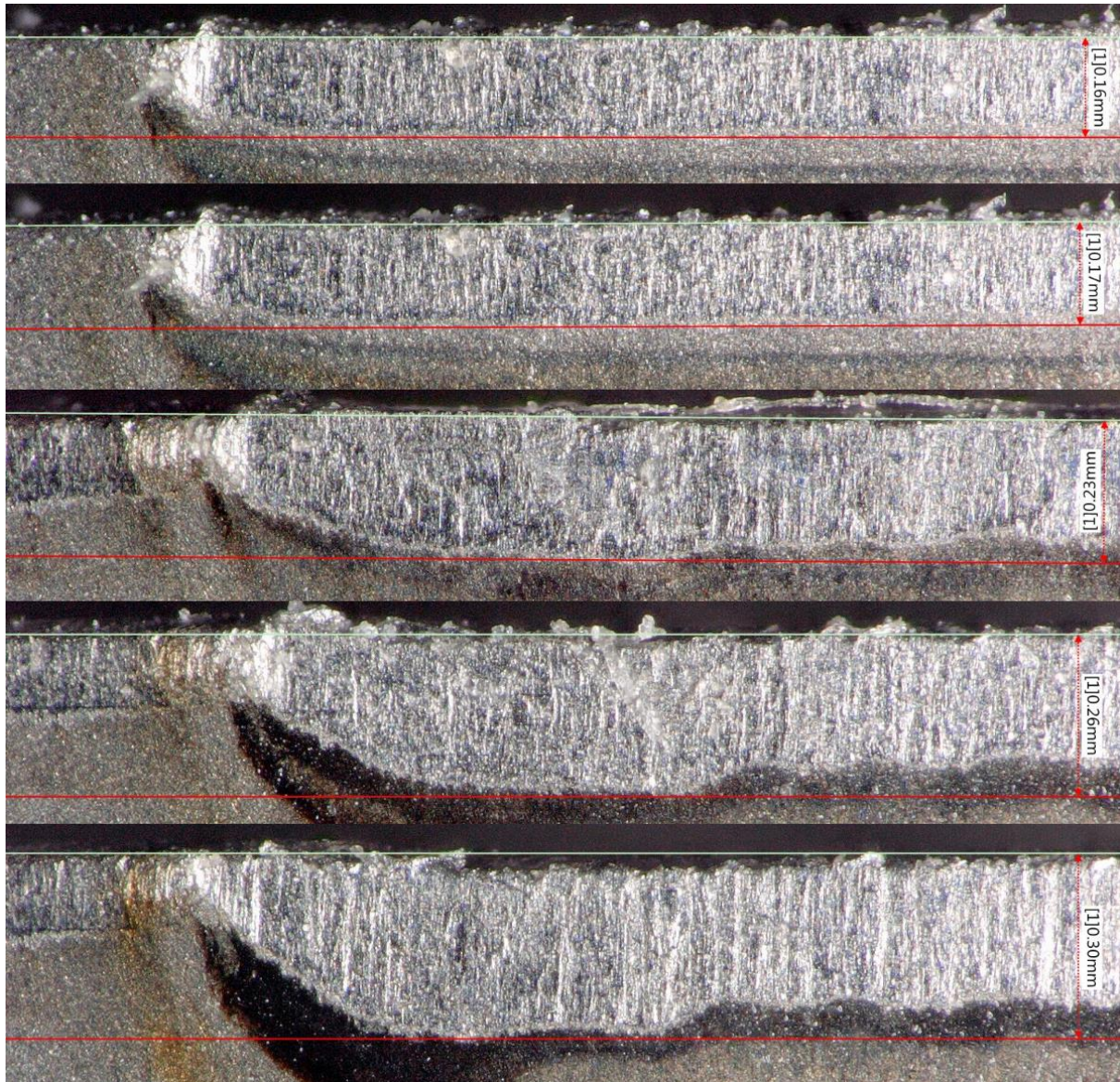
ZÁVISLOST OPOTŘEBENÍ HŘBETU VBD NA ČASE V ŘEZU pokus č. 4: prototyp RTI - čelo - 100 bar



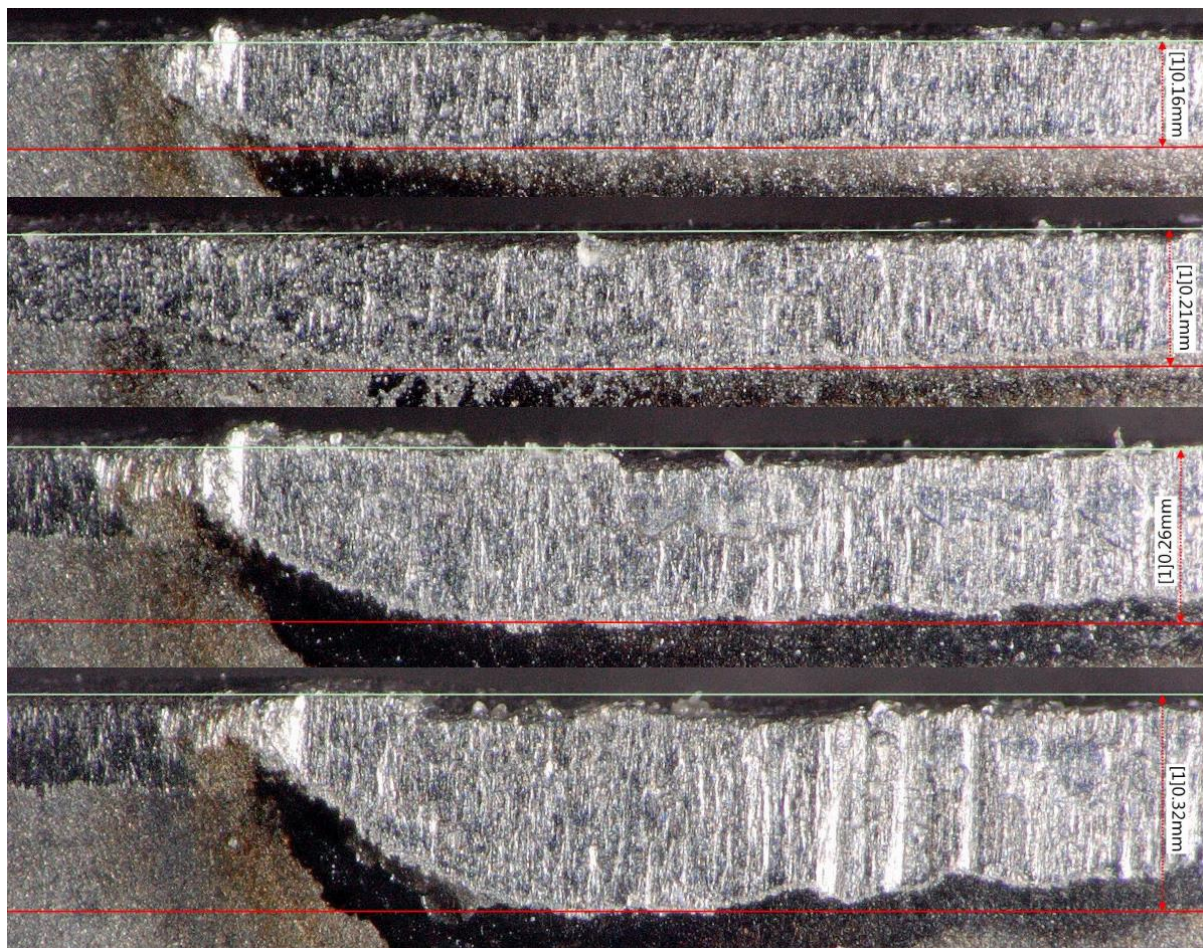
pokus č. 4 – opakování č. 1: RTI - čelo - 100 bar



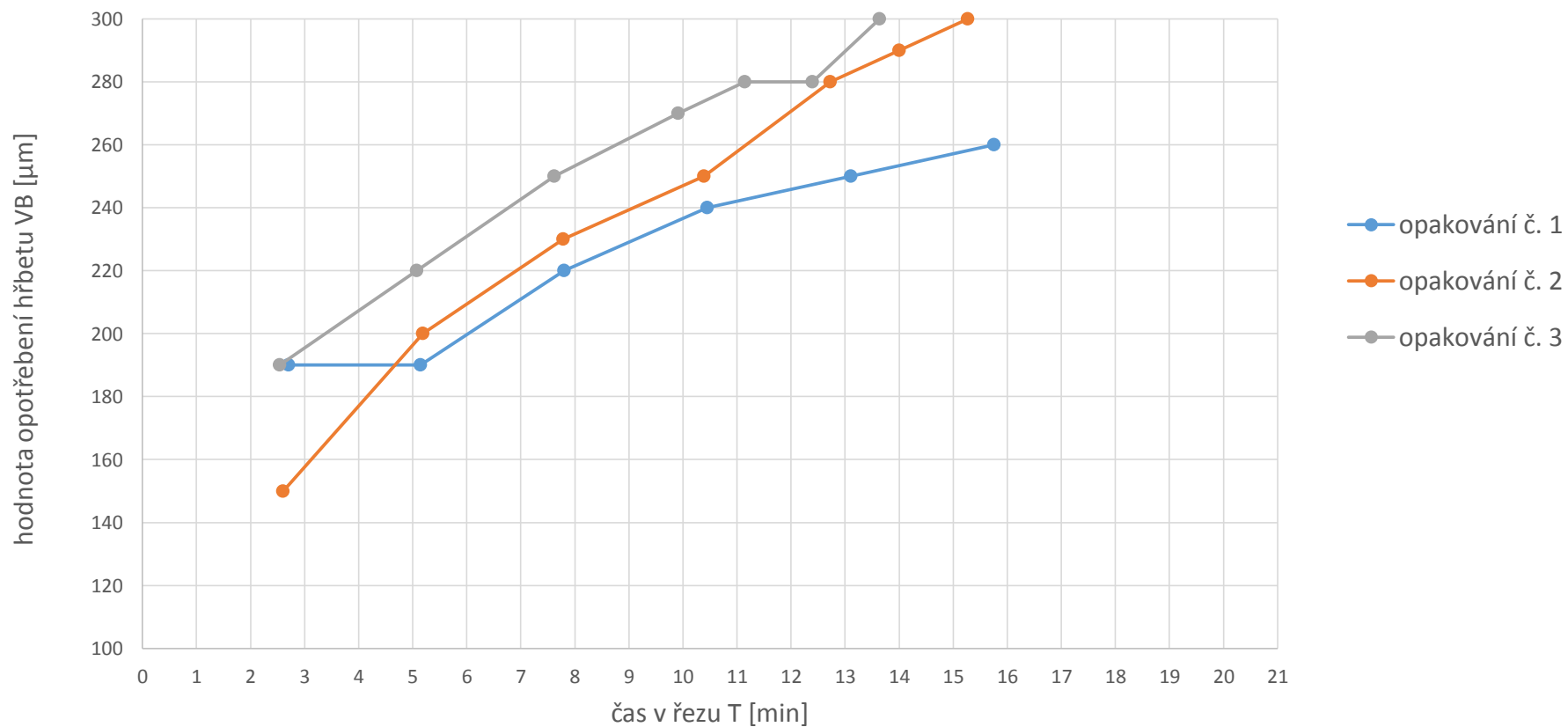
pokus č. 4 – opakování č. 2: RTI - čelo - 100 bar



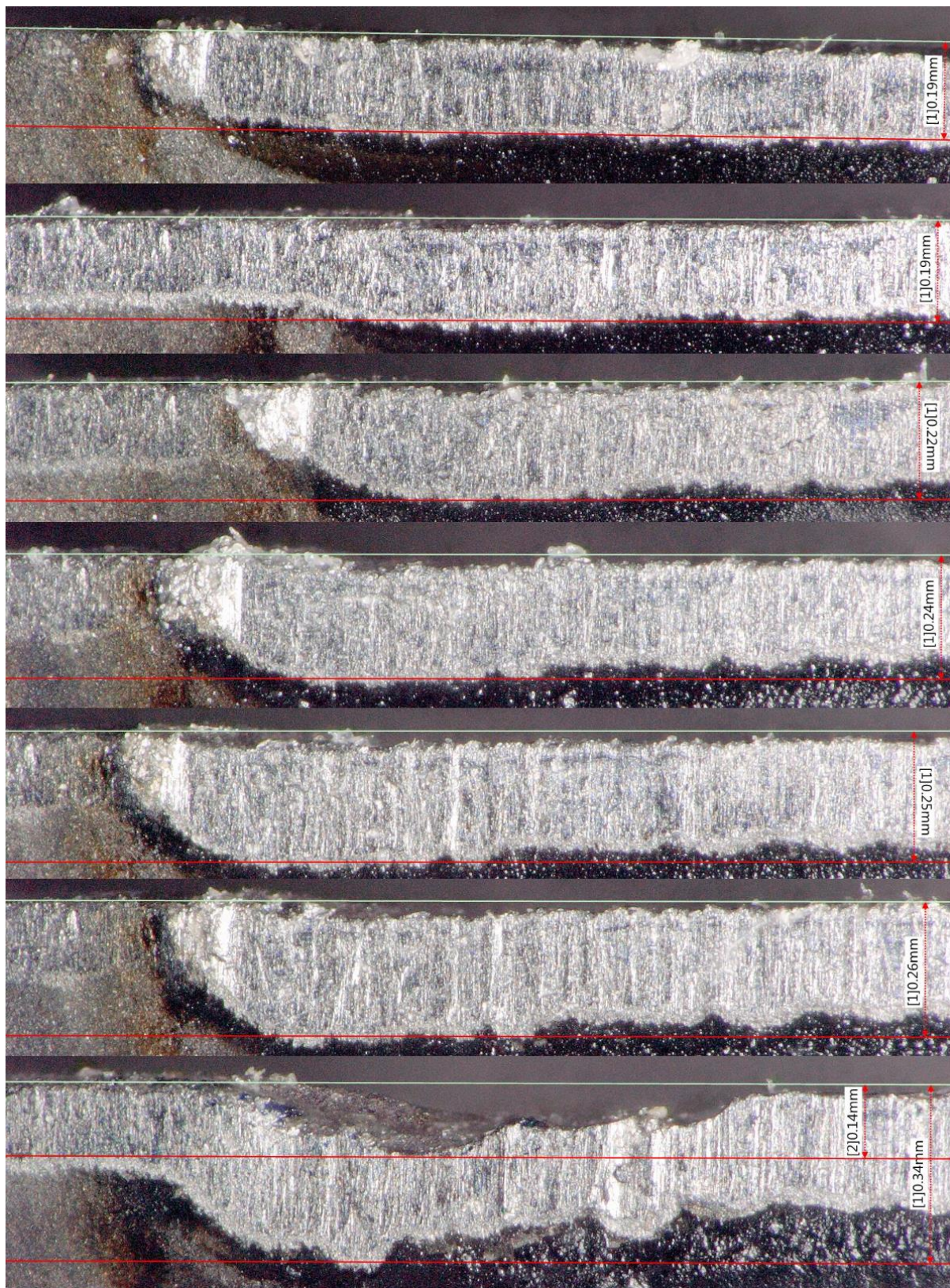
pokus č. 4 – opakování č. 3: RTI - čelo - 100 bar



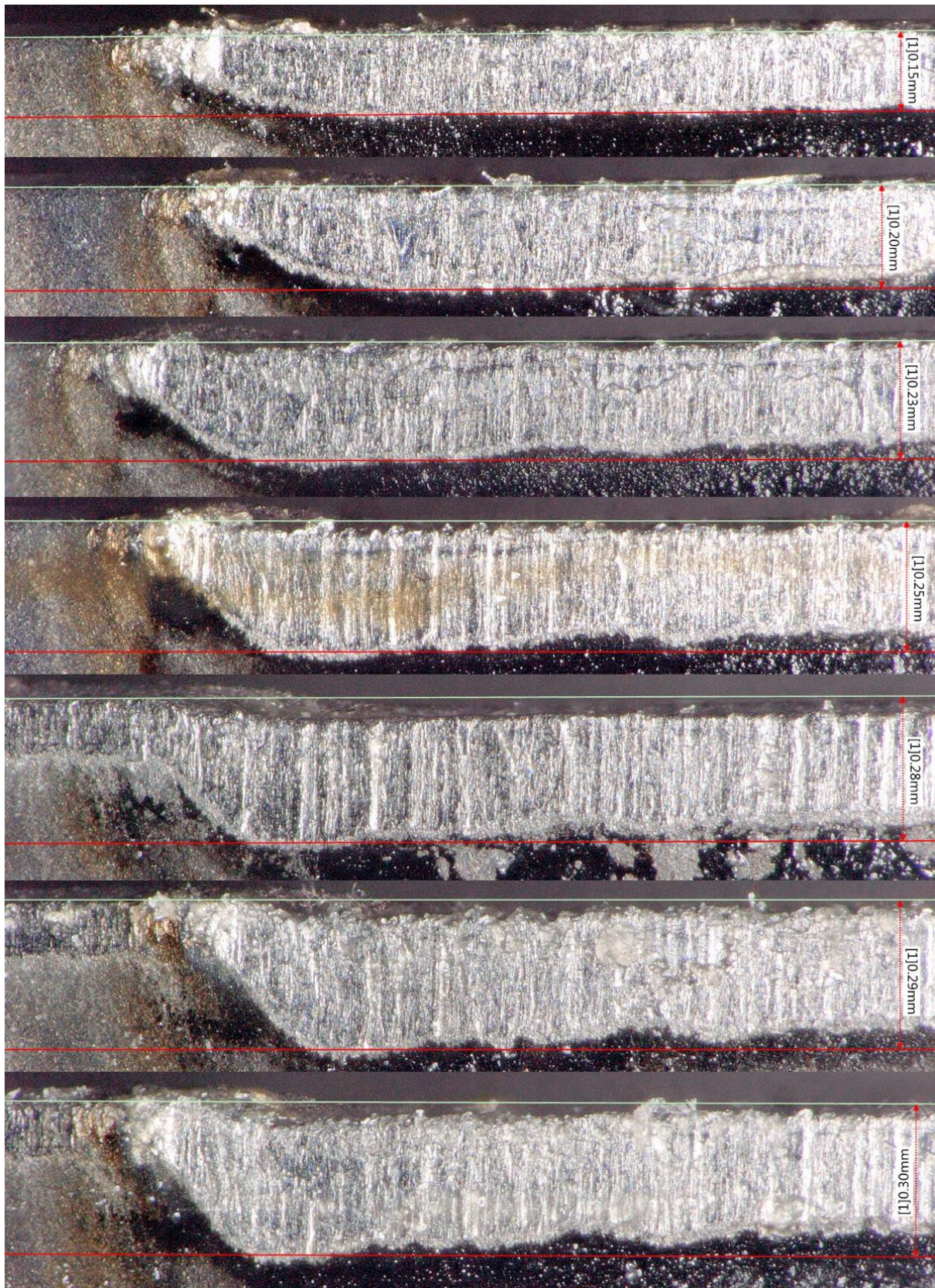
ZÁVISLOST OPOTŘEBENÍ HŘBETU VBD NA ČASE V ŘEZU pokus č. 5: prototyp RTI - čelo - 100 bar



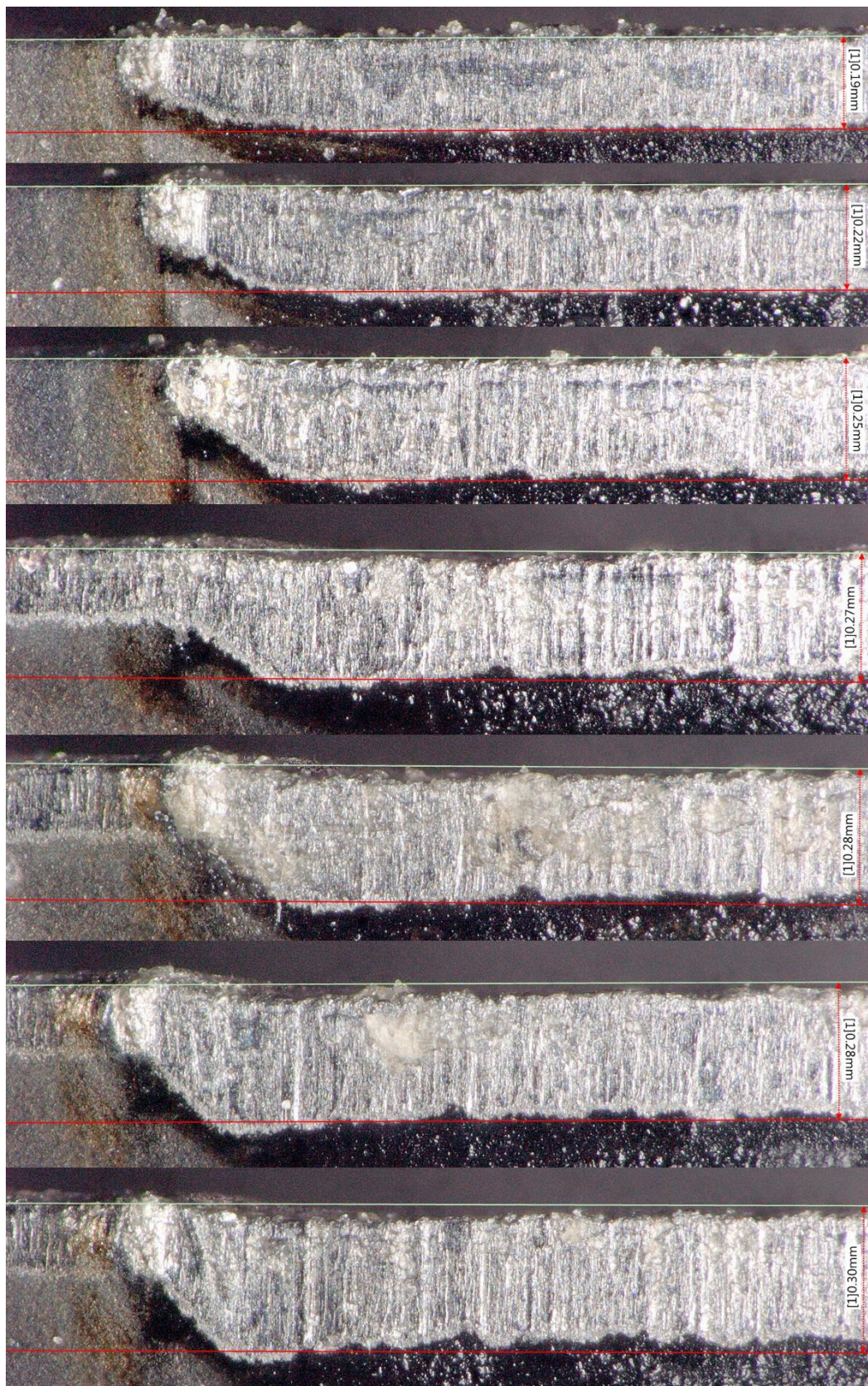
pokus č. 5 – opakování č. 1: RTI – čelo + hřbet - 20 bar



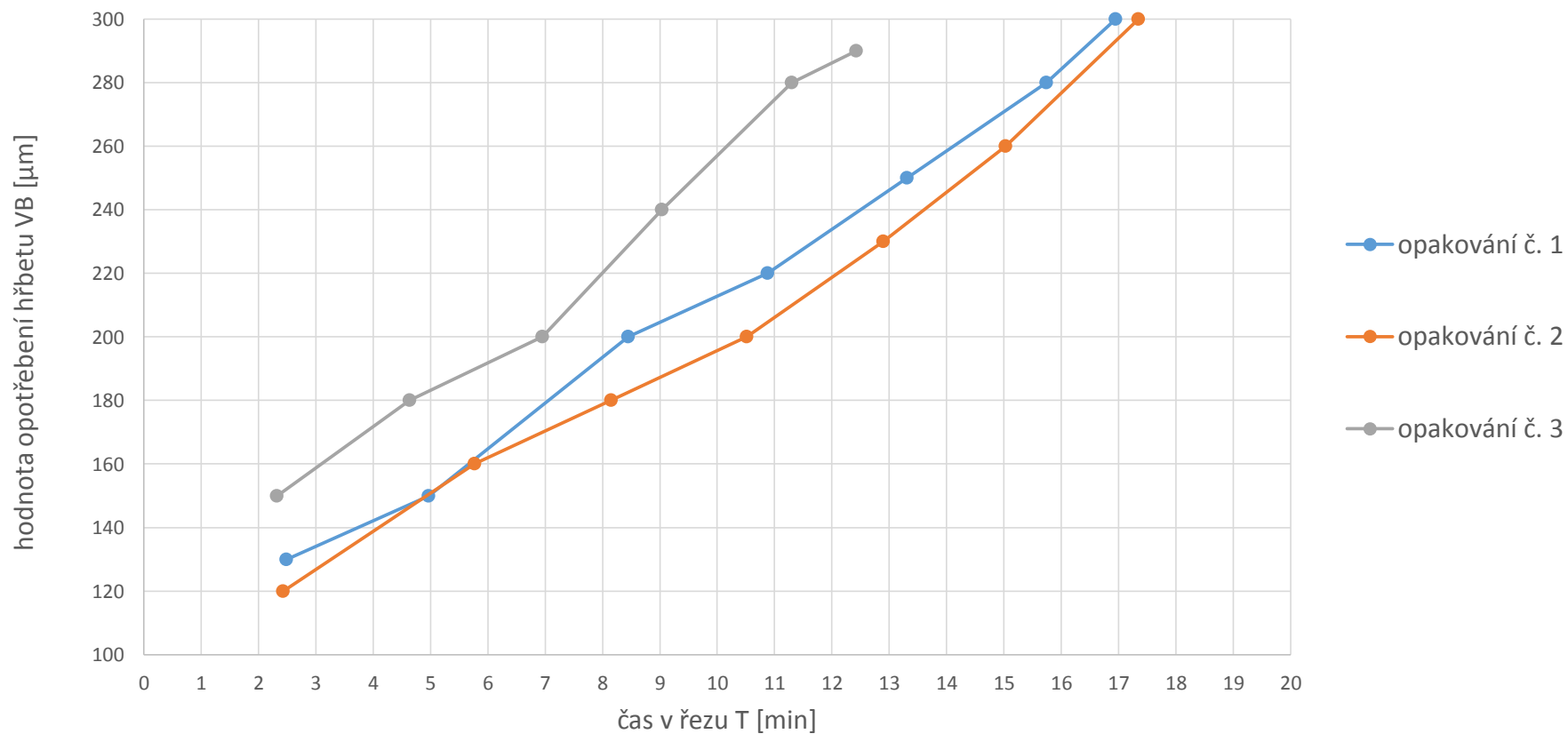
pokus č. 5 – opakování č. 2: RTI – čelo + hřbet - 20 bar



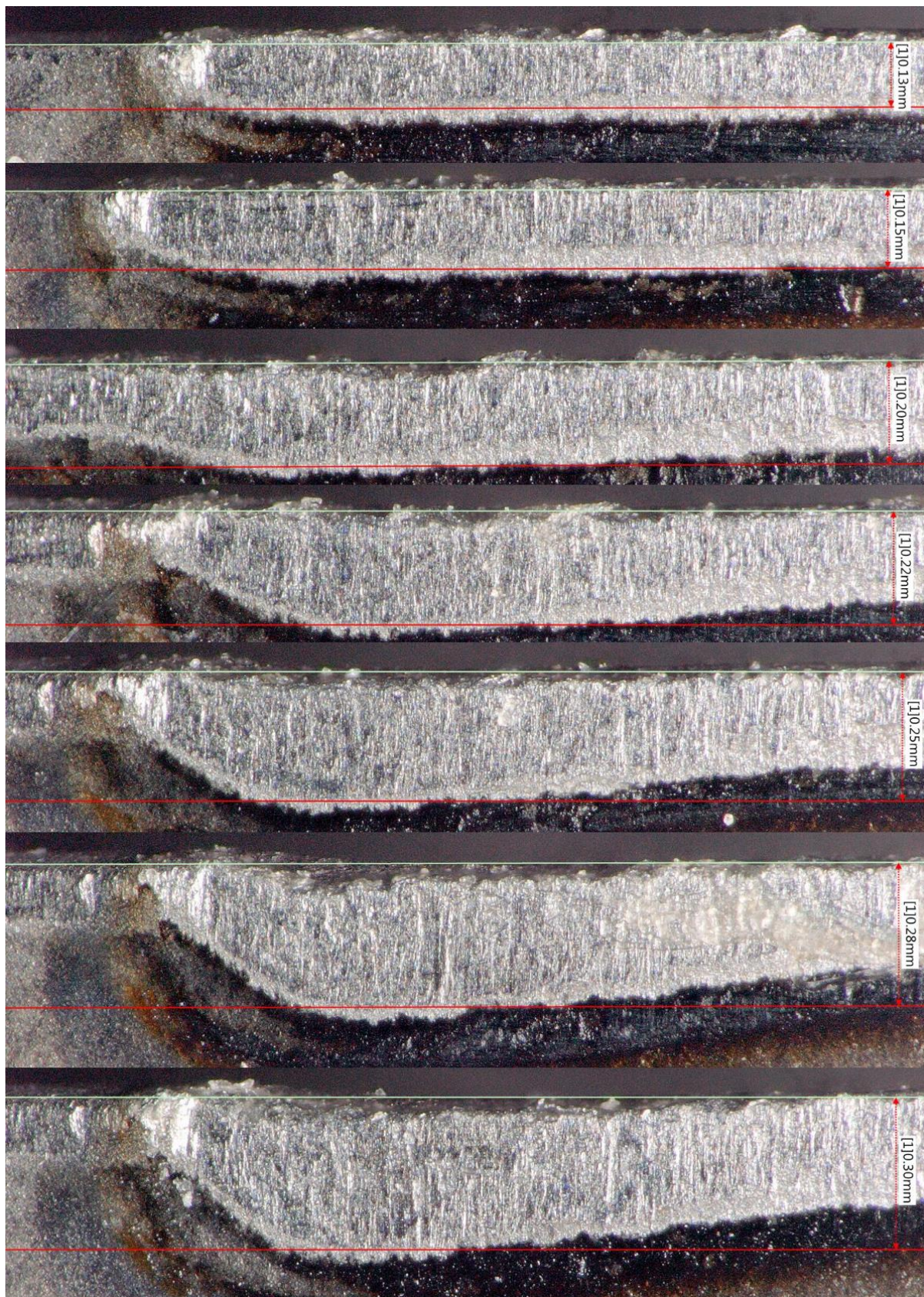
pokus č. 5 – opakování č. 3: RTI – čelo + hřbet - 20 bar



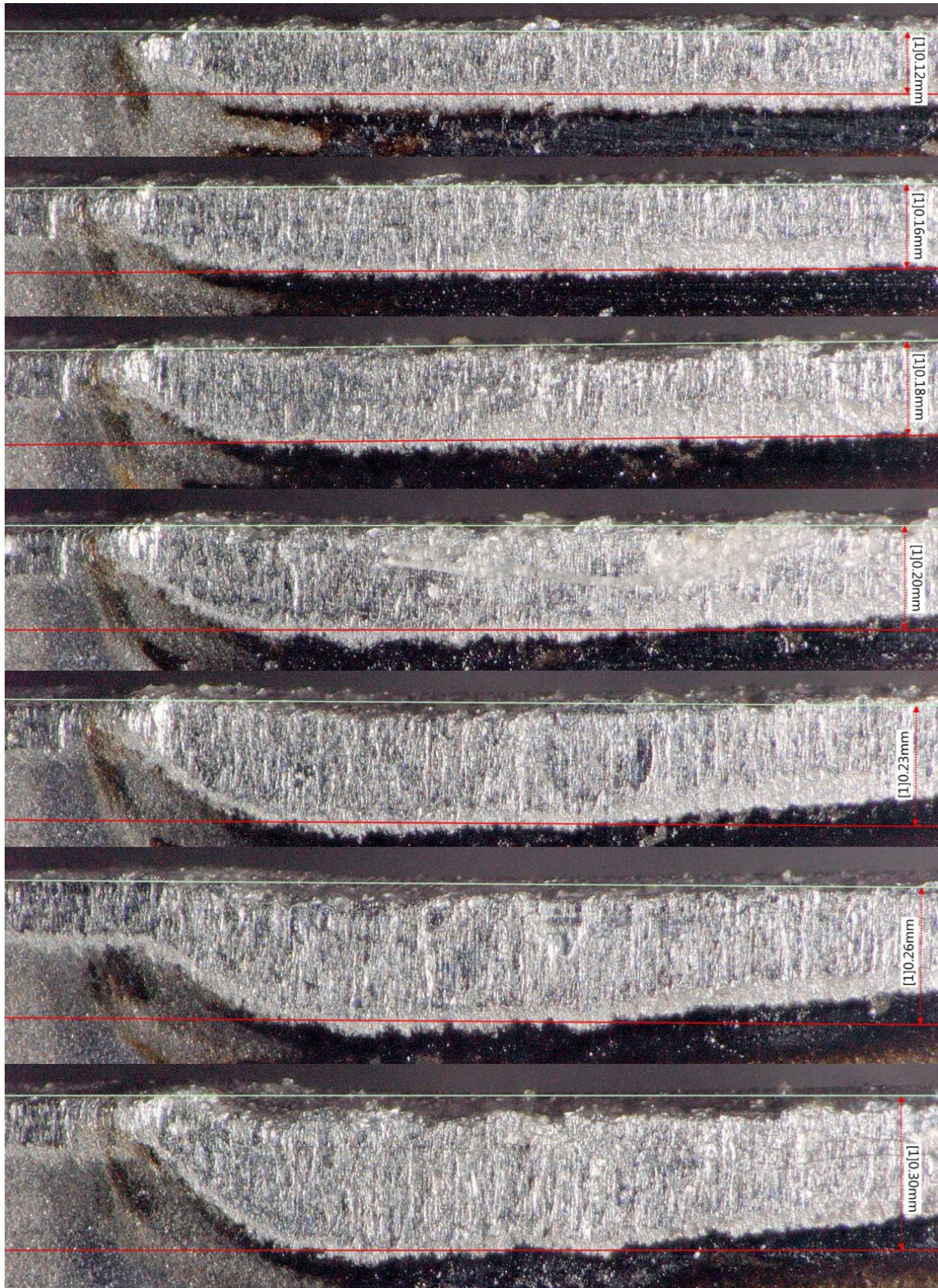
ZÁVISLOST OPOTŘEBENÍ HŘBETU VBD NA ČASE V ŘEZU pokus č. 6: prototyp RTI - čelo + hřbet - 100 bar



pokus č. 6 – opakování č. 1: RTI – čelo + hřbet - 100 bar



pokus č. 6 – opakování č. 2: RTI – čelo + hřbet - 100 bar



pokus č. 6 – opakování č. 3: RTI – čelo + hřbet - 100 bar

