

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní Inženýrství

Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Trvanlivost vrtáků při obrábění slitiny Inconel 718

Autor: **Bc. Jiří Šimeček**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří ŠIMEČEK**
Osobní číslo: **S15N0099P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu: **Trvanlivost vrtáků při obrábění slitiny Inconel 718**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Analýza současného stavu
3. Návrh a realizace experimentů
4. Vyhodnocení
5. Závěr

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

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **Příkryl, Zdeněk; Musílková, Rosa. Teorie obrábění. Vyd. 1. Praha : SNTL, 1971.**
- **Mádl, Jan; Schubert, Vilém. Základy experimentálních metod a optimalizace v teorii obrábění : Určeno pro posl. fak. strojní. [2.], přeprac. vyd. Praha : ČVUT, 1974.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 19. října 2016

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé Diplomové práce, doktoru Miroslavu Zetkovi za asistenci při testech a odborné konzultace při vyhodnocování. Děkuji také Západočeské Univerzitě v Plzni za poskytnuté podmínky při studiích a závěrem bych rád poděkoval i rodičům a prarodičům za projevenou podporu a důvěru po celou dobu studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Bc. Šimeček	Jiří	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
VEDOUcí PRÁCE	Ing. Zetek, Ph.D.	Miroslav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Trvanlivost vrtáků při obrábění slitiny Inconel 718		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	90	TEXTOVÁ ČÁST	54	GRAFICKÁ ČÁST	36
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce je zaměřena na vrtání superslitiny Inconel 718 a cílem je určení vlivu substrátu nástroje na jeho trvanlivost. Přínosem práce je mimo jiné zjištěný projev vlastností substrátu při vrtacím procesu i za použití tenkých vrstev.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">Materiál, Inconel 718, obrábění, vrtání, trvanlivost, experiment</p>

SUMMARY OF DIPLOMA THESIS

AUTHOR	B.Eng Šimeček		Jiří
FIELD OF STUDY	N2301 „Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Ing. Zetek, Ph.D.		Miroslav
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Durability of drills when machining Inconel 718		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	90	TEXT PART	54	GRAPHICAL PART	36
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis is focused on the Nickel superalloy drilling and its point is to determinate how the tool substrate affects its durability. The contribution is that the features of the substrates affects the drilling process eventhough the coating is used.
KEY WORDS	Material, Inconel 718, machining, drilling, durability, experiment

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Analýza současného stavu	11
2.1	Niklové superslitiny	11
2.1.1	Inconel 718	12
2.2	Řezné materiály	16
2.3	Vrtání Inconelu 718	21
3	Návrh a realizace experimentů.....	23
3.1	Obecná východiska, cíle a podmínky experimentu	23
3.2	Použité technické prostředky	25
3.2.1	Stroje.....	25
3.2.2	Nástroje.....	27
3.2.3	Ostatní technické prostředky	29
3.3	Návrh prvního experimentu	31
3.4	Návrh druhého experimentu	32
3.5	Přehled prováděných experimentů.....	32
4	Vyhodnocení výsledků	33
4.1	Experiment (1-A).....	33
4.2	Experiment (1-B)	35
4.3	Experiment (2-A).....	40
4.4	Experiment (2-B)	43
4.5	Rozbor výsledků	47
5	Závěr	55
6	Citovaná literatura.....	56
7	Seznam obrázků	57
8	Přílohy.....	58
8.1	Příloha č. 1	58
8.2	Příloha č. 2	64
8.3	Příloha č. 3	70
8.4	Příloha č. 4	76
8.5	Příloha č. 5	83

Přehled použitých zkratk a symbolů

HSS	Rychlořezná nástrojová ocel
PM-HSS	Prášková rychlořezná nástrojová ocel
CNC	Počítačem řízený stroj
HRC	Hodnota tvrdosti dle Rockwella
MPa	Jednotka tlaku
Rp 0,2 %	Smluvní mez kluzu
WC	Karbid wolframu
SK	Slinutý karbid
CBN	Kubický nitrid bóru
PCD	Polykrystalický diamant
HV	Hodnota tvrdosti dle Vickerse
HSC	Vysokorychlostní obrábění
MQL	Obrábění s minimem procesní kapaliny
CVD	Chemická metoda nanášení povlaku
PVD	Fyzikální metoda nanášení povlaku
PACVD	Plazmou asistované chemické nanášení povlaku
AlTiN	Nitrid titanu s hliníkem
3D	Hloubka vrtání trojnásobku průměru
HB	Hodnota tvrdosti dle Brinella
TiN	Nitrid Titanu
TiCN	Karbo-nitrid titanu
MCV 750 A	Obchodní označení stroje
TripleCoating	Obchodní název tenké vrstvy
X, Y, Z	Označení os
n	Otáčky za minutu
f	Posuv za minutu
Vc	Řezná rychlost
VB	Označení pro opotřebení hřbetu nástroje
R76, M4, T15	Označení testovaných substrátů
M_z, F_y, F_z	Složky zatížení

1 Úvod

Konkurenční prostředí na trhu vyvolává aktivitu firem v oblasti snižování nákladů výroby, zkvalitňování služeb a výrobků, ale je také jedním z hnacích motorů pro výzkum a vývoj. Zejména v posledních letech má výzkum a vývoj obrovský dopad na sílu pozic jednotlivých firem technického zaměření na trhu. Nezáleží na tom, jedná-li se o elektroniku, automobilový průmysl nebo výrobce řezných nástrojů.

Konkrétně u řezných nástrojů hovoříme o silné progresi ve vývoji a konečné výsledky experimentů ukazují, že výkonnost a trvanlivost nástrojů vzrůstá meziročně o desítky procent. Jedním z přetrvávajících problémů řezných nástrojů jsou ovšem jejich špatné výsledky při obrábění tzv. *superslitin*¹. Tyto těžkoobrobitelné slitiny mají vysokou tvrdost, odolnost proti korozi a s rostoucí teplotou výrazně zvyšují i svou tažnost, což zapříčiňuje ztížené podmínky pro tvorbu třísky a vede k nadměrnému zvyšování teplot v místě řezu. Následuje pak vznik „návarů“, rozrušování povrchové vrstvy nástroje, a nakonec dochází k úplnému znehodnocení břitu. Niklové slitiny typu *Inconel 718* se navíc při zvýšeném tlaku při obrábění samy zpevňují, proto je důležité vnést do materiálu co nejméně přebytečného napětí a při tom docílit efektivního úběru obráběného materiálu.

Efektivita však v tomto případě není pouze uměle vyvolaný pojem, nýbrž řeší skutečný problém. Při celkovém pohledu na strojní třískové obrábění v současné době je patrné, že strojní operace vrtání je jedna z nejfrekventovanějších operací vůbec. Odhad podílu vrtacích operací na celkových strojních časech je 36 % a u CNC strojů dokonce až 40 %. Oproti tomu operace soustružení a frézování mají téměř stejný podíl v rozmezí 25 ÷ 26 %.

Právě zde je tedy značný prostor pro vývoj a inovace, které dokáží zkrátit celkový čas výroby a tím i výrazně zlevnit celý proces. Je evidentní, že problém trvanlivosti není jen na straně nástroje, ale závisí také na použitých strategiích a zvolených řezných podmínkách při obrábění. Na výrazném zvýšení produktivity nástrojů měl zásluhu také příchod vysokotlakého chlazení a vnitřního chlazení, které umožňuje přívod procesní kapaliny přímo do řezu. Tento pokročilý způsob chlazení je při vrtání superslitin velice přínosný nejen kvůli intenzivnější redukci teplot na dně vrtaného otvoru, ale také kvůli lepšímu odvodu třísek šroubovici vrtáku směrem vzhůru. [1]

Podstata práce

Cílem této práce je experimentální určení vlivu substrátu (materiálu nástroje) na trvanlivost šroubovitých vrtáků za účelem jejich vývoje. Testované vrtáky jsou vyrobeny ze tří různých práškových nástrojových ocelí a obráběným materiálem je specifická slitina železa a niklu s obchodním označením *Inconel 718*. Úkolem této práce je experimentálně ověřit, či vyvrátit odlišnosti nově vyvinutých materiálů v oblasti vrtání malých a středních otvorů a pokusit se určit příčiny možných vlivů na celkovou trvanlivost nástrojů. Smyslem práce není sběr velkého množství dat pro výstupy detailních testů se zahrnutím statistiky a pravděpodobnosti, nýbrž provedení tzv. pilotních testů pro potvrzení či vyvrácení vhodnosti nových materiálů pro vrtání *Inconelu 718*.

Vzhledem k obecně nízkému počtu odborných studií na toto téma v českém jazyce je naprostá většina zdrojů překládána ze zahraničních publikací.

¹ Superslitinami jsou myšleny slitiny na bázi *Fe* a *Ni* (*Co*), které jsou schopny pracovat při teplotách vyšších než 540 °C.

2 Analýza současného stavu

Část věnovaná teoretickým východiskům práce má za úkol především blíže specifikovat obráběný materiál (*Inconel 718*) a nástrojové materiály běžně používané pro jeho obrábění. Dále jsou zde zmíněna obecná doporučení pro obrábění superslitin a konkrétně popsána je zde také problematika vrtání.

2.1 Niklové superslitiny

Niklové superslitiny se pro účely obrábění dělí do následujících čtyř základních skupin a dvou podskupin. Pro tuto práci je důležitá skupina „D“, do které patří mimo jiné i *Inconel 718*.

Skupina A

Tyto slitiny mají malou mechanickou pevnost a velmi vysokou houževnatost. Obsahují více než 95 % niklu a jsou velice elastické v žíhaném stavu. Pro dosažení lepší obrobiteľnosti a hladkého povrchu se doporučuje tento materiál ve stavu za studena taženém. Do skupiny „A“ patří slitiny: 200, 201, 205, 212, 222.

Skupina B

Jedná se zejména o slitiny niklu a mědi, které mají vyšší pevnost a o něco nižší houževnatost než slitiny skupiny „A“. Tažené za studena a tažené za studena se sníženým vnitřním pnutím mají nejlepší obrobiteľnost a jakost povrchu po obrobení. Do skupiny „B“ patří slitiny: *Monel 400, 401, 450, Ferry slitina, Invar 36, 48, Kovar a inco slitina MS 250*.

Skupina C

Zahrnuje zejména slitiny tuhého roztoku nikl-chrom-železo, které jsou podobné austenitickým nerezovým ocelím. Opět jsou obráběny nejvíce ve stavu za studena taženém a do této skupiny patří slitiny: *Nickel 270, Monel K-500 (nestařený), Inconel 600, 601, 690, Nimonic 75, 86, Incoloy 800, 800HT, 802, 825, DS, Inco 330, 020*.

Skupina D

Je tvořena primárně stárnutím vytvrditelnými slitinami a má dvě podskupiny.

- Skupina D-1: Patří sem slitiny ve stavu nestařeném, jako je například *Duranickel 301, incoloy 925, MA 956 a Ni-span-c 902*.
- Skupina D-2: Patří sem slitiny ze skupiny „D-1“ ve stavu stařeném a také některé další jako například *Inconel 617, 625, 706, 718, X-750, Nimonic 80A, 81, 90, 105, 115, 263, 901, PE11, PE16, PK56, Incoloy 903, 907* a další.

Speciálním případem je slitina *Monel R-405*, která nespadá do žádné z výše uvedených skupin či podskupin. Tato slitina je navržena pro vysokoprodukční výrobu v dlouhotočných automatických strojích. *Monel R-405* v sobě spojuje tuhost, pevnost a odolnost proti korozi *Monelu 400* s vynikající obrobiteľností. Neposkytuje však tak dobrý povrch po obrobení jako *Monel 400*. [2]

2.1.1 Inconel 718

Inconel 718 je obchodní označení pro austenitickou superslitinu železa s niklem a dalšími prvky jako je například chrom, niob nebo molybden. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.1 spadá do kategorie niklových superslitin *D-2*. Vykazuje excelentní výsledky ve zkouškách tahem a tečení do teplot až 1300 °F (~ 704,4 °C). Velmi dobře odolává oxidaci a korozi do 1800 °F (~ 982,2 °C).

Použití

Inconel je hojně využíván v aplikacích, kde je vyžadována vysoká pevnost při extrémně vysokých či naopak nízkých teplotách. Nejvíce je rozšířen v letectví, nukleárním nebo petrochemickém průmyslu. Konkrétním využitím jsou pak například části tryskových motorů, nebo velmi namáhané části letadel jako je podvozek apod. [3]

Vysokým teplotám dokáže odolávat díky oxidační vrstvě, která vzniká na jeho povrchu, když je zahříván a chrání tak povrch materiálu. Dalším použitím jsou například rotory turbodmychadel, těsnění, tlakové nádoby, tepelné výměníky, ale také výfukové systémy závodních speciálů *F1* nebo *NASCAR*, kde teploty výfuků přesahují i 1000 °C. [4]

Chemické složení

V Tab. 1 jsou uvedeny limitní hodnoty jednotlivých chemických prvků v této slitině.

Prvek	Min. [%]	Max. [%]
C	--	0,08
Mn	--	0,35
Si	--	0,35
P	--	0,015
S	--	0,015
Ni + Co	50	55
Cr	17	21
Co	--	1
Fe	Zbytek	
Al	0,35	0,8
Mb	2,8	3,3
Ti	0,65	1,15
B	0,001	0,006
Cu	--	0,15
Cb + Ta	4,75	5,5

Tab. 1 - Mezní hodnoty obsahu chemických prvků v *Inconelu 718*. [3]

Mechanické a fyzikální vlastnosti Inconelu 718

V Tab. 2 je uvedena závislost modulu pružnosti v tahu na zvyšující se teplotě. Stejně tak je v tabulce vidět změna koeficientu teplotní roztažnosti tohoto materiálu při různých teplotách. V Tab. 3 jsou pak vidět konkrétní hodnoty z tahové zkoušky při různých teplotách (zkušební tyč ½“).

Teplota [°C]	Modul pružnosti v tahu [$MPa \cdot 10^3$]	Koeficient teplotní roztažnosti [$10^{-6}/^{\circ}C$]
21	208	-
93	205	12,8
204	202	13,5
316	194	13,9
427	186	14,2
538	179	14,4
649	172	15,1
760	162	16,0
871	127	-
954	78	-

Tab. 2 - Hodnoty vybraných mechanických a fyzikálních vlastností Inconelu 718. [5]

Teplota [°C]	Mez kluzu [MPa]	Pevnost v tahu [Mpa]	Tažnost [%]
93	1172	1407	21
204	1124	1365	20
316	1096	1344	20
427	1076	1317	19
538	1069	1276	18
649	1027	1158	19
760	758	758	27

Tab. 3 - Mechanické vlastnosti Inconelu 718 v tahu. [5]

Hustota – 8220 Kg/m^3

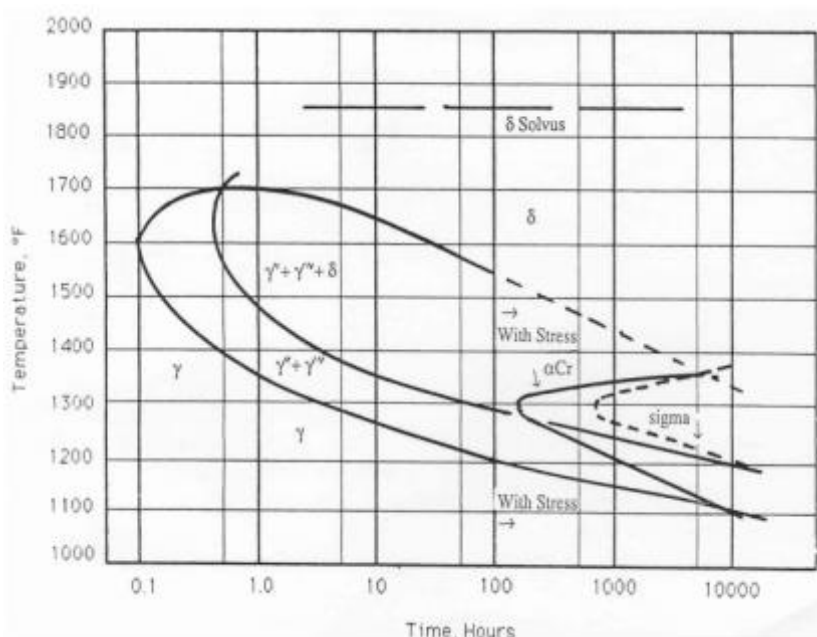
Teplota tavení – $1210 \div 1344 \text{ }^{\circ}C$

Měrný elektrický odpor – $1210 \mu\Omega/mm$

Tepelné zpracování

Niklové slitiny mohou být podrobeny pěti základním typům tepelného zpracování. Jejich volba závisí samozřejmě na chemickém složení slitiny, požadovaných výstupních vlastnostech a cílovém použití materiálu. Mezi tepelné zpracování niklových slitin patří: žihání, žihání pro odstranění vnitřního pnutí, rozpouštěcí žihání, žihání pro vyrovnání pnutí a tvrzení stárnutím. [6]

Na Obr. 1 je $T-T-T^2$ diagram pro slitinu *Inconel 718*. Na svislé ose je vynesena teplota ve stupních Fahrenheita a na vodorovné ose čas v hodinách. Křivky znázorňují hranice tvorby jednotlivých fází.



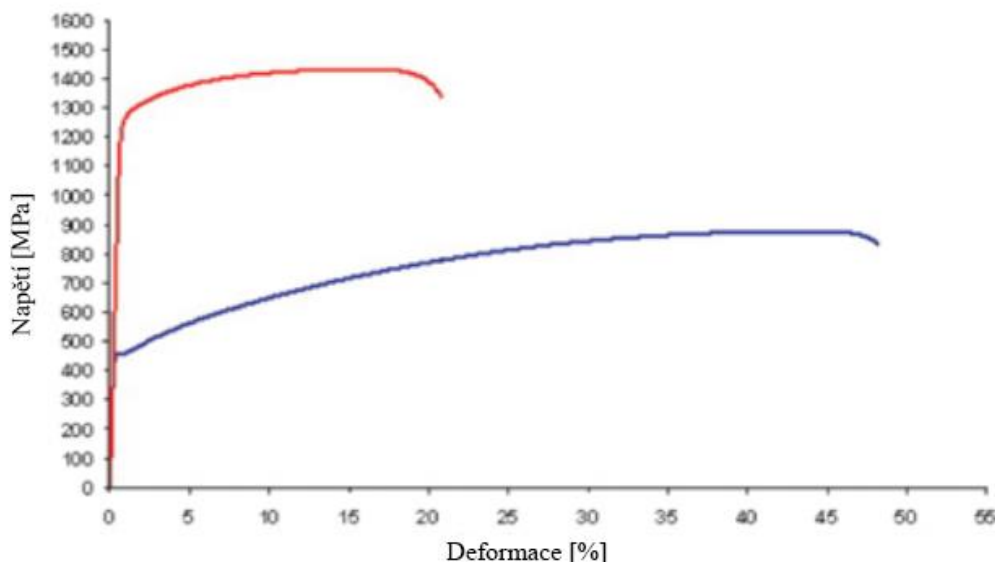
Obr. 1 - Transformační diagram Inconelu 718. [7]

Nikl nebo niklové slitiny, které byly zpevněny zpracováním za studena jako je například válcování, nebo hluboké tažení apod. vyžadují „změkčení“. Tepelné zpracování, které produkuje takto upravený materiál se nazývá žihání nebo měkké žihání. Princip žihání niklových slitin je stejný jako u ocelí tzn. ohřev na určitou teplotu po určitý čas a poté pomalé ochlazení. Při tomto procesu dochází k celkovému měknutí materiálu vlivem rekrystalizace. Odlišnosti v chemickém složení slitin vyžadují modifikace žihacího procesu, stejně tak jako atmosféry pece. Například precipitačně tvrzené slitiny musí být prudce ochlazeny, pokud je žádoucí co největší změknutí. Žihání může být otevřené, uzavřené nebo v solné lázni. Tvrzení stárnutím je často používané tepelné zpracování niklových slitin. Probíhá v uzavřených boxech uvnitř pece, přičemž by součásti měli být uloženy volně, ale bez zbytečného volného prostoru. Elektrická pec je optimální, jelikož dokáže udržet nastavenou teplotu $\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zabraňuje případné kontaminaci. U *Inconelu 718* probíhá ideálně ohřevem na $720\text{ }^{\circ}\text{C}$, následuje osmi hodinová výdrž, poté ochlazení pece na $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ a další výdrž na této teplotě až do dokončení cyklu stárnutí (cca 18 hodin), nakonec se materiál dochlazuje na vzduchu. [6]

² T-T-T je diagram, ve kterém je znázorněna závislost fázové transformace slitiny na teplotě a čase.

Na Obr. 2 je porovnání tahového diagramu žíhaného *Inconelu 718* s *Inconelem 718* vytvrzeným stárnutím. Na vodorovné ose je vynesena deformace v procentech a na svislé ose napětí v MPa. Žíhání probíhalo za teploty 960 °C, jedná se tedy o rozpouštěcí žíhání a chladícím prostředím byla voda. Tvrzení stárnutím probíhalo tímto způsobem:

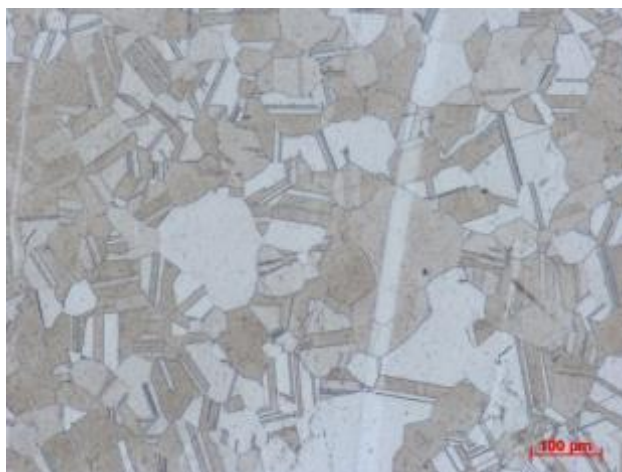
960 °C → voda → 720 °C / 8 h → 2 h chlazení → 620 °C / 8 h → dochlazení na vzduchu. [8]



Obr. 2 - Tahový diagram žíhaného (modrá čára) a tvrzeného (červená čára) *Inconelu 718*. [8]

Konkrétní mikrostruktura *Inconelu 718*, který je použit v experimentu této diplomové práce je vidět na Obr. 3. Jedná se o reálný snímek výbrusu polotovaru, jehož tepelné zpracování a vlastnosti jsou známé. Materiál byl tepelně zpracován následujícím způsobem: 1032 °C → 01:08h → vzduch a 780 °C → 06:08h → vzduch. Výsledná tvrdost po tepelném zpracování je 38 HRC, pevnost v tahu 1252 Mpa a smluvní mez kluzu (RP 0,2 %) 948 Mpa. Základ tohoto materiálu tvoří matrice γ a nejdůležitější fází pro vytvrzování je fáze γ'' . Jedná se o zpevňující fázi Ni_3Nb . [9]

Při pohledu na strukturu materiálu jsou jasně zřetelné sekundární fáze a velké množství dvojčatových pásů typicky vznikajících mechanismem plastické deformace při tepelném zpracování *Inconelu 718*. Detailní a ucelené informace o všech materiálech použitých při tomto experimentu obsahují materiálové listy v přílohách č. 4 a č. 5.



Obr. 3 - Mikrostruktura *Inconelu 718*

2.2 Řezné materiály

Vzhledem k tomu, že řezný materiál nástrojů použitých pro experiment je předem definován jako rychlořezná nástrojová ocel vyrobená práškovou metalurgií, je tato kapitola zaměřena především na materiály HSS³ a PM-HSS⁴. Pozornost je věnována samozřejmě i hojně využívanému materiálu pro vrtání Inconelu 718, kterým je slinutý karbid.

Slinutý karbid

Slinutý karbid je nástrojový materiál tvořený tvrdou složkou karbidů (např. WC⁵) a houževnatým pojivem v podobě kobaltu nebo niklu. Je vyráběn práškovou metalurgií a jeho výsledné vlastnosti záleží na mnoha různých faktorech (minimální vzdálenost mezi zrny karbidu, jemnost apod.). Z hlediska použití řezného nástroje se slinuté karbidy dělí do pěti skupin dle normy ISO. Tyto kategorie určují, pro jaký druh materiálu obrobku jsou nástroje z SK vhodné:

P – Běžné oceli.

M – Korozivzdorné, žáruvzdorné a žárovečné oceli.

K – Litiny.

N – Neželezné kovy.

S – Speciální slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti.

H – Zušlechtěné oceli, kalené oceli, tvrzené kokilové litiny.

Vrtáky ze slinutého karbidu pro obrábění tvrdých superslitin nabízí všichni velcí výrobci nástrojů, je tedy hojně využíván a propagován, ale propagační tlak prodejců nemusí vždy korespondovat s objektivní skutečností. Struktura tohoto poměrně tvrdého kompozitního materiálu neumožňuje vybroušení ostří tak precizně, jako je tomu u rychlořezných nástrojových ocelí a kvůli jeho omezené houževnatosti také nesnáší vysoké kroutící momenty. Nástroje z SK⁶ je tedy nutné využívat s malými úběry a tím pádem vyššími otáčkami. To znamená, že se v oblasti řezu generuje vysoké teplo. Méně ostrá geometrie může být příčinou velké míry plastické deformace obráběného materiálu zapříčiňující zhoršení obrobiteľnosti (v případě niklových slitin). Nejen z tohoto důvodu se používá vnitřních chladících systémů, kde kanálky uvnitř nástroje přivádí procesní kapalinu přímo k břitu. Z hlediska dlouhodobé trvanlivosti nástrojů je další nevýhodou náchylnost nástrojů z SK na odštípnutí. V případě takového poškození břitu dochází velice rychle k celkové devastaci nástroje jako takového. I přes vysokou míru zastoupení nástrojů z SK v oblasti vrtání Inconelu 718 je stále dosahováno ne příliš velkých trvanlivostí a dle mého názoru je stále nutné hledat lepší a efektivnější řešení například využitím materiálů umožňujících odlišné přístupy k vrtání s ohledem na vrtaný materiál.

³ HSS je zkratka pro „High Speed Steel“ (rychlořeznou ocel).

⁴ PM-HSS je zkratka pro rychlořeznou ocel vyrobenou práškovou metalurgií. (PM = Powder Metallurgy).

⁵ WC je zkratka pro karbid wolframu

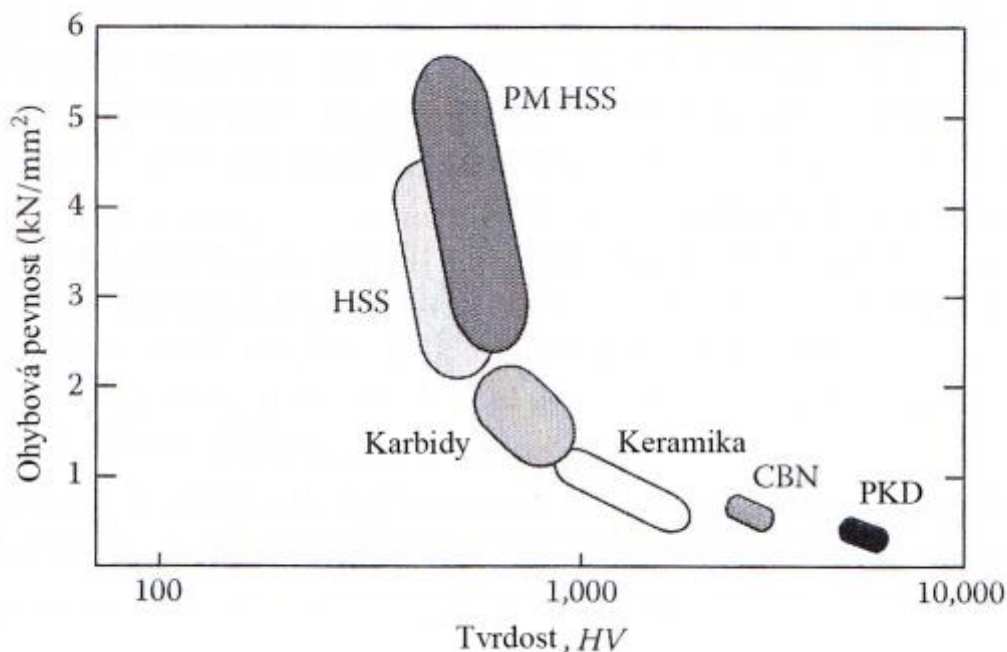
⁶ SK je zkratka pro slinutý karbid.

HSS a PM-HSS

Rychlořezné nástrojové oceli spadají do kategorie vysoce legovaných ocelí navržených pro efektivní obrábění jiných materiálů při vysokých řezných rychlostech (v porovnání s uhlíkovými oceli). Moderní rychlořezné oceli v kombinaci s pokročilými povlaky dokáží dokonce konkurovat i nástrojům se slinutými karbidy, což bylo ještě před několika lety nemyslitelné. [10]

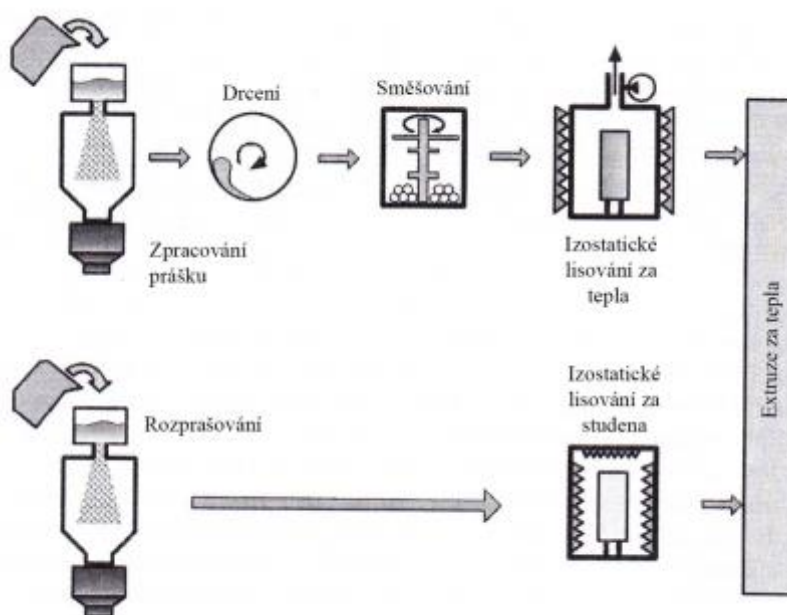
Výhody rychlořezných nástrojových ocelí jsou následující [10]:

- Výrazně vyšší ohybová pevnost než u ostatních nástrojových materiálů (viz. Obr. 4). To přináší vyšší odolnost proti odštipování břitu, možnost použití vyššího posuvu na zub a větší hloubky řezu.
- Oproti ostatním řezným materiálům je možné dosáhnout ostřejšího řezného břitu i konvenčním způsobem broušení. Díky tomu je možné dosáhnout lepších pracovních vlastností nástroje, které se projevují vyšší kvalitou obrobeného povrchu, přesnějšími rozměry součástí, nižšími řeznými silami (výhoda zejména pro obrábění tenkých stěn s nízkou tuhostí) nebo nižšími teplotami v místě řezu. Největší výhodou z pohledu obrábění superslitin je celkově nižší práce transformovaná do „tvrdnutí“ obráběného materiálu.
- Větší odolnost vůči méně tuhým soustavám (u starých strojů apod.)
- Větší odolnost vůči nehomogenitám obráběných materiálů, vměstkům, návarům apod.
- Větší odolnost vůči teplotním šokům a přizpůsobivost téměř jakýmkoli lubrikantům.
- Nízká cena (zhruba 350 Kč/kg)



Obr. 4 - Porovnání nástrojových materiálů (tvrdost-ohybová pevnost). [10]

Problémem rychlořezných ocelí vyráběných litím, je nerovnoměrná distribuce primárních karbidů v celém objemu materiálu a tím způsobená heterogenita mechanických vlastností. Existuje několik různých způsobů, jak lze tyto nedostatky odstranit nebo alespoň minimalizovat. Nejeftivnějším, ale také nejnákladnějším způsobem je výroba oceli práškovou metalurgií. Výzkum a vývoj výroby HSS práškovou metalurgií odstartoval okolo roku 1965 za účelem zvýšení funkčních vlastností, výkonnosti v náročných aplikacích a také konkurenceschopnosti rychlořezných nástrojových ocelí vůči slitým karbidům. Výroba práškové oceli je tvořena několika kroky [10]:



Obr. 5 - Metody zpracování práškové oceli [10]

Hlavní výhody práškové rychlořezné nástrojové oceli jsou:

- Žádná makrosegregace karbidů.
- Vyšší pevnost, houževnatost a kujnost při zachované stejné tvrdosti.
- Izotropní vlastnosti zajišťují menší deformace při kalení nástrojů.
- Lepší „brusitelnost“ (extrémně důležité pro výrobu nástrojů).
- Umožňuje výskyt vyššího obsahu karbidů, což znamená vyšší tvrdost a ořezavost.
- V mnoha případech značný nárůst životnosti nástroje.

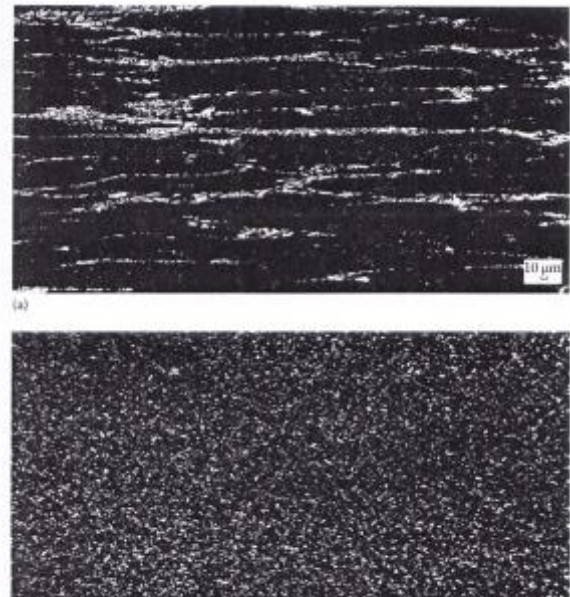
Mezi hlavní nevýhody PM-HSS patří:

- Vysoká cena (zhruba dvojnásobná oproti HSS – 800Kč/Kg)

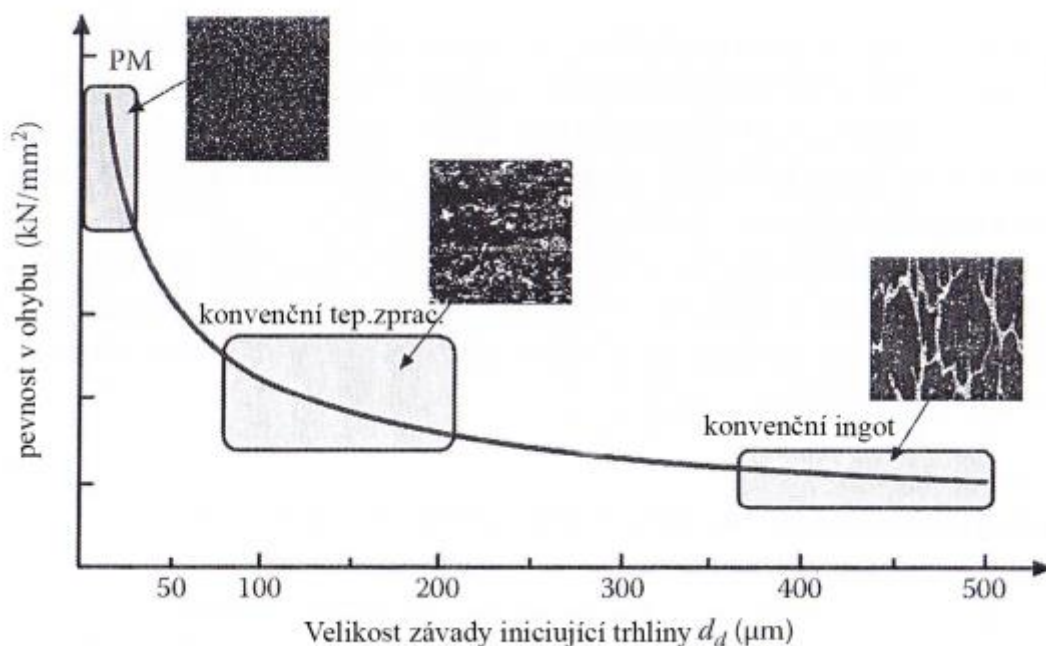
Mezi největší výhody výroby prášku „rozstříknutím“ inertním plynem patří perfektní kulový tvar kovu, vysoká hustota a zaručená konzistentnost a předvídatelnost chování při deformování. Izostatické lisování za tepla je proces zhušťování prášku v peci za vysokého tlaku (100-200 MPa) a teplot (od 900 °C do 1250 °C). Tlak plynu působí rovnoměrně ve všech směrech pro dodržení izostatických vlastností a 100 % zhuštění. Takto vyrobená prášková ocel je vysoce kvalitní alternativou pro oceli vyrobené konvenčním způsobem. Je však nutné si uvědomit, že teplota, při které probíhá spékání je nižší než bod tání práškového materiálu, jelikož základním principem spékání je difuze materiálu v pevném stavu. [10]

Na Obr. 6 je vidět zřetelný rozdíl mezi rozložením primárních karbidů (bílé skvrny) v rychlořezné nástrojové oceli vyrobené litím a oceli vyrobené technologií PM.

Velice důležitý z hlediska materiálu je Obr. 7, který znázorňuje závislost ohybové pevnosti materiálu na velikosti potenciálních iniciátorů lomu v podobě defektů materiálu. Lze tak učinit jednoznačný závěr, že prášková metalurgie je pro nástroje vyžadující houževnatost při zachované tvrdosti velice přínosná a volba tohoto materiálu pro účel obrábění niklových slitin je vzhledem k nárokům kladeným na nástroj opodstatněná. [10]



Obr. 6 - mikrostruktura lité HSS (nahore)
a práškové HSS (dole) [10]



Obr. 7 - Vliv velikosti závady iniciující trhliny na pevnost v ohybu [10]

Tenké vrstvy

Deponování tenkých vrstev na řezné materiály pozitivně ovlivňuje jejich trvanlivost, může rapidně zvýšit jejich výkonnost a umožňuje například využití pokročilých moderních technologií jako je HFC, HSC nebo MQL. Nástroje s tenkými vrstvami je ovšem nutné vnímat jako citlivý systém, na který má vliv mnoho parametrů a komplexní pohled na tuto problematiku je naprosto klíčový.

Vysoce důležitá je volba vhodné kombinace substrátu⁷ a nanášené vrstvy, druh tepelného zpracování polotovaru nástroje, stav povrchu po broušení, zbytkové napětí v nástroji před depozicí, mikrogeometrie, ale také dodržení technologického postupu deponování a mnoho dalších vlivů. Je tedy evidentní, že pozitivní vliv tenkých vrstev na nástroj a jeho vlastnosti vyžaduje vysokou obezřetnost a široké znalosti nejen z oblasti materiálového inženýrství. Konkrétně u rychlořezných ocelí je hlavním omezujícím faktorem náchylnost k popuštění substrátu při vyšších teplotách a možné ztrátě jeho mechanických vlastností. Proto je velmi důležitá volba samotné metody nanášení vrstvy. Z tohoto důvodu je nevhodné použití CVD⁸ technologie nanášení vrstev, jelikož se při ní dosahuje teploty až 1050 °C. Technologie nanášení, která je používána běžně, je technologie PVD⁹. Při této technologii odpařený kov ulpí na povrchu nástroje (například v podobě nitridů) při zhruba 400-600 °C. PVD povlaky díky své tvrdosti zvyšují odolnost nástroje proti opotřebení a jejich vnitřní tlakové pnutí pozitivně přispívá k vyšší houževnatosti břitu. Vyšší je také odolnost proti vzniku hřebenových trhlin při zvýšených teplotách. Pro úplnost je nutné zmínit také vhodnost použití pokročilé technologie nanášení tenkých vrstev s asistencí plazmy. Jedná se o chemické nanášení vrstvy, ale při nižších teplotách (okolo 500 °C). Tato pokročilá technologie nese označení PACVD¹⁰ a vrstvy nanášené touto metodou se vyznačují velmi nízkým koeficientem tření.

Nejčastěji využívanou vrstvou pro vrtání niklových slitin je vrstva *AlTiN*. Její základní parametry jsou uvedeny v Tab. 4. [10]

Parametr	Hodnota
Technologie	PVD
Barva	Černo-fialová
Tvrdost	HV 4500
Souč. tření	0,45
Teplotní stabilita	800÷900 °C

Tab. 4 - Parametry vrstvy *AlTiN*. [10]

⁷ Substrát je v materiálové terminologii podklad (polotovar) pro depozici tenké vrstvy čili řezný nástroj nebo vyměnitelná břitová destička.

⁸ CVD je zkratka anglického výrazu Chemical Vapor Deposition - chemické metody nanášení povlaku.

⁹ PVD je zkratka anglického výrazu Physical Vapor Deposition - fyzikální metody nanášení povlaku.

¹⁰ PACVD je zkratka anglického výrazu Plasma Assisted CVD - chemické metody nanášení povlaku s asistencí plazmy.

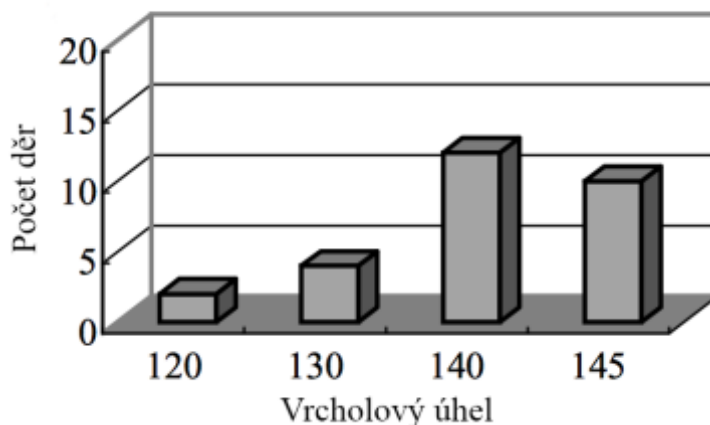
2.3 Vrtání Inconelu 718

Při použití vrtáků pro výrobu otvorů do *Inconelu 718* v leteckém průmyslu, kde je použití tohoto materiálu velmi frekventované, se nejčastěji jedná o díry malých průměrů o hloubce maximálně $3D^{11}$. Tyto informace jsou brány jako základní vstupní data pro další orientaci při řešení problematiky geometrie nástroje, odvodu třísek apod.

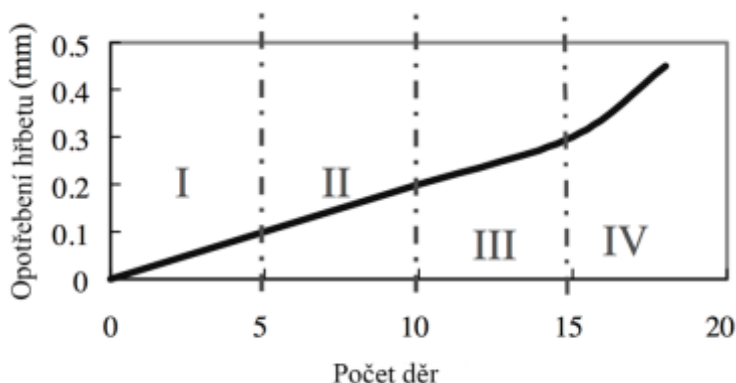
Výsledky obdobného experimentu ze zahraniční instituce

Tématem opotřebení šroubových vrtáků při obrábění *Inconelu 718* se zabývá Y.C. Chen a Y.S. Liao z národní Taiwanské univerzity v odborné publikaci s názvem „*Studie mechanismu opotřebení při vrtání superslitiny Inconel 718*“. Tato studie si klade za úkol zjistit vliv geometrie vrtáků, druhu procesní kapaliny a použité tenké vrstvy na celkovou životnost nástrojů. Vzhledem k podobnosti parametrů experimentu v této studii s cílem této Diplomové práce je vhodné seznámit se s jejími výsledky.

Při experimentu jsou vrtány 30 mm hluboké díry s výplachem třísky po 5 mm s vrtáky o průměru 10,5 mm. Jako testovací vrtáky jsou zvoleny vrtáky ze slinutého karbidu od firmy *Guhring, Inc.* Deponované nástroje jsou opatřeny tenkou multi-vrstvou *TiAlN* nanesenou technologií PVD. Řezné podmínky se přirozeně odlišují, jelikož experiment pracuje s karbidovými vrtáky s optimalizovanou geometrií (vyšší je zejména posuv). Použitá řezná rychlost je $13,2 [m/min]$, otáčky $400 [ot./min]$ a posuv $40 [mm/min]$. Na Obr. 8, je vidět závislost trvanlivosti vrtáku na vrcholovém úhlu. Z výsledků na obrázku jednoznačně plyne, že pro vrtání tvrdých materiálů jsou vhodnější vrtáky s větším vrcholovým úhlem (130° a více). Na Obr. 9 jsou výsledky experimentu v podobě závislosti opotřebení hřbetu na počtu vyrobených děr. Uvedené výsledky jsou pro nástroje opatřené tenkou multi-vrstvou *TiAlN*. Zřetelné je také významné zvětšení opotřebení v IV. části, kde dle autorů již docházelo k markantnímu vylamování břitů. [9]



Obr. 8 - Závislost trvanlivosti vrtáku na vrchol. úhlu [9]



Obr. 9 - Opotřebení vrtáků s vrstvou *TiAlN* [9]

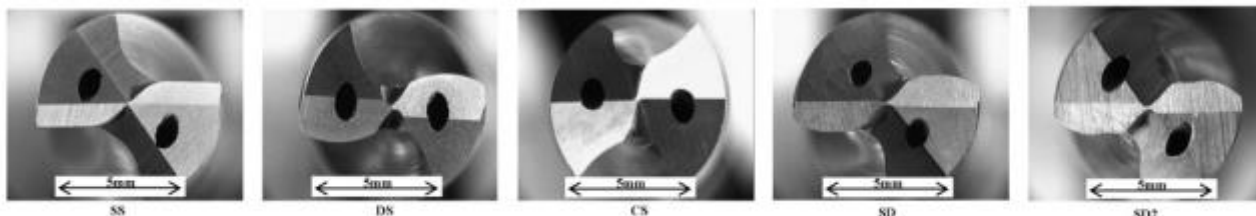
¹¹ Zkratkou 3D je zde myšlena hloubka díry, která je rovna trojnásobku průměru vrtaného otvoru.

Obecná doporučení

Existují čtyři základní cesty, kterými dosáhnout vyšší produktivity vrtání:

- Snížení axiálních sil a kroutícího momentu optimalizací geometrie.
- Zvýšení torzní tuhosti vrtáku.
- Zlepšení „samostředících“ schopností vrtáku.
- Změna tvaru vznikajících třísek a vylepšení jejich odvodu z místa řezu.

Při obrábění niklových slitin je důležité zaručit stabilní posuv bez prodlev a zabránit tak zpevnění materiálu na dně díry v určité hloubce, které by ztěžovalo následné odřezávání třísky a mohlo zapříčinit úplné zlomení vrtáku a obecně by vazba stroje, nástroje a obrobku měla vykazovat co nejvyšší tuhost. Standardní vrtáky z rychlořezné oceli (HSS) jsou použitelné pro všeobecné účely vrtání slitin skupiny *A* a *B*, HSS vrtáky s rozměrnějším středem nástroje jsou pak doporučovány pro vrtání slitin skupiny *C* a *D*. Kobaltové rychlořezné oceli zajišťují vyšší trvanlivost vrtáků a z hlediska geometrie je výhodné zvýšení vrcholového úhlu na 135°. Ukázky možných tvarů vrtáku jsou vidět na Obr. 10. Pro vrtání děr s průměrem vyšším než 20 mm je výhodné použití děličů třísek na břitu nástroje, které budou tvořit užší třísky a tím sníží tendenci k zanášení šroubovitých drážek vrtáku. Obecně lze říci, že pro udržení efektivity a stability řezného procesu je nutné zajistit dostatečné chlazení a odvod třísek z místa řezu. Lze také definovat obecné doporučení řezných podmínek pro vrtání do Inconelu, které je samozřejmě pouze informativní (viz. Tab. 5.). [1] [10] [11]



Obr. 10 - Druhy tvarů geometrií pro aplikaci vrtání superslitin [11]

			V_C dle vrstvy [m/min]			posuv dle průměru [mm; mm/ot.]			
Materiál	HB	HSS	TiN	TiAlN	TiCN	ø9-12	ø13-17	ø18-24	ø25-35
Inconel 718	221-310	M48	7	10	9	0,10	0,15	0,20	0,25

Tab. 5 - Obecná doporučení řezných podmínek pro vrtání Inconelu 718 [10]

3 Návrh a realizace experimentů

Kapitola si klade za cíl seznámit s principem, cílem a podmínkami experimentu. Zahrnuje také obecná východiska experimentu, odůvodnění změn provedených v testech a je v ní také popsána samotná realizace. Nechybí samozřejmě ani rozbor výsledků.

3.1 Obecná východiska, cíle a podmínky experimentu

Veškerá východiska pro návrh experimentu vychází ze specifického cíle Diplomové práce a jsou zahrnuta do návrhu experimentu:

- Opakovatelnost experimentu.
- Reprodukovatelnost výsledků.
- Jednoznačnost.
- Aplikovatelnost v praxi.
- Jednoduchost.

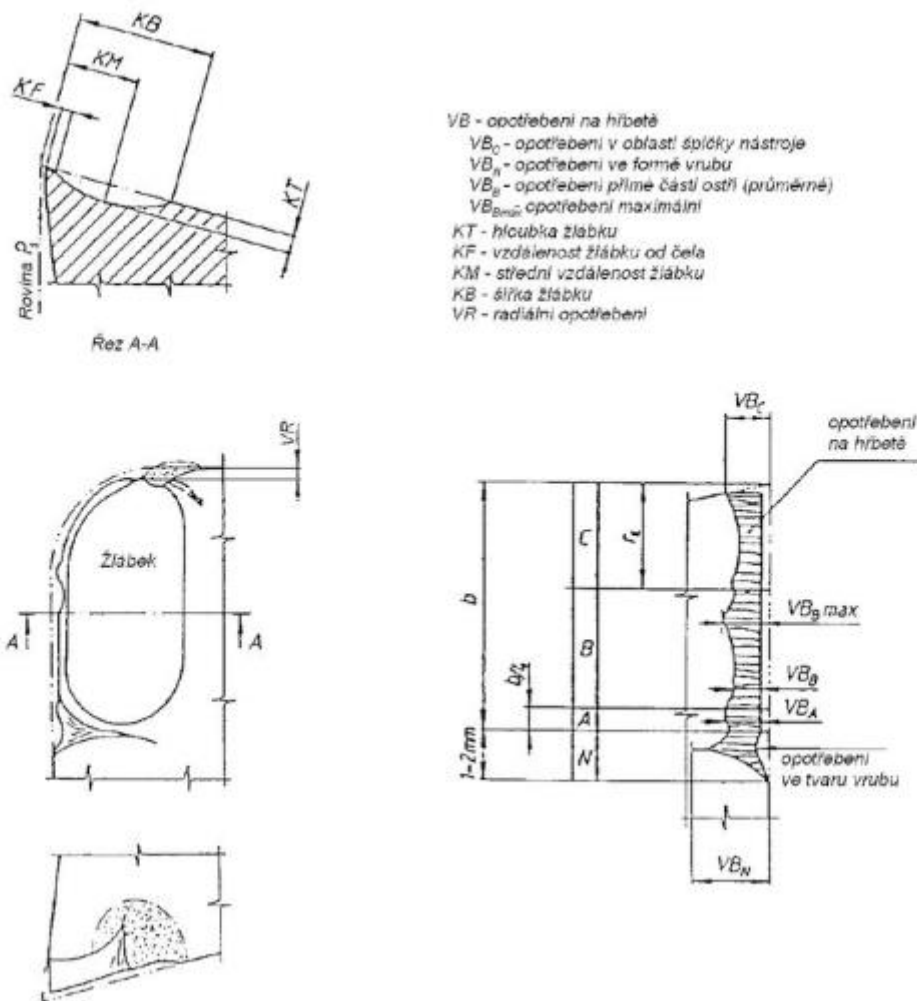
Primárně je však žádoucí určit přístup k obrábění Inconelu 718 jako takového. Jak bylo již zmíněno v kapitole 2.3 je několik způsobů, jak řešit efektivitu vrtání a tento způsob či kombinace několika způsobů udává směr celého výzkumu. V případě tohoto experimentu je to využití torzní tuhosti a houževnatosti vrtáků z práškové nástrojové oceli při nízkých otáčkách a vysokém posuvu. Účelem tohoto přístupu je redukce teplot vznikajících v oblasti řezu, které zapříčiňují zpevnění doposud neobrobené vrstvy materiálu pod vrtákem. Takto zpevněný materiál je pak problematicky obrobitelný a požadavky na nástroj jsou mnohonásobně vyšší. PM-HSS oceli jsou pro tuto aplikaci z dosud dostupných materiálů jednoznačně nejvhodnější díky svým vlastnostem, jak bylo zmíněno v kapitole 2.2. Opakovatelnost experimentu je zaručena záznamem o použitých technických prostředcích, řezných podmínkách a způsobu vyhodnocování výsledků. Technické prostředky použité pro experiment jsou zmíněny v kapitole 3.2. Řezné podmínky použité při experimentu můžete vidět v tabulce Tab. 6. a způsob vyhodnocování je popsán v kapitole 4.

VELIČINA	HODNOTA	JEDNOTKY
n	320	ot./min
f	22	mm/min
V_c	10	m/min
D	10	mm
L	10	mm
Chlazení	Vnější	7-8% ¹²

Tab. 6 - Řezné podmínky všech testů

¹² Koncentrace oleje ve vodě

Reprodukovatelnost výsledků je zaručena standardním způsobem vyhodnocování opotřebení na hřbetu (VB_B) dle mezinárodní normy *ISO 3685* (viz. Obr. 11) s definovanou kritériální hodnotou opotřebení a také měřením řezných sil za daných řezných podmínek. Známe je také tepelné zpracování a celkový stav obráběného materiálu. K reprodukovatelnosti výsledků také v neposlední řadě přispívá identická geometrie všech nástrojů a kontrola vstupních parametrů všech nanesených tenkých vrstev. Jen s těmito parametry lze s vysokou mírou jistoty říci, že výsledky jsou validní.



Obr. 11 - Vyhodnocování opotřebení břítu nástroje. [12]

Jednoznačnost je nejpodstatnější část z východisek ve smyslu splnění cíle diplomové práce. Je totiž nutné zajistit takové podmínky experimentu, aby výsledky jednoznačně vyjadřovaly vliv pouze substrátu nástroje (ideální stav). Zaručení takových podmínek je technicky i finančně velice náročné a vyžaduje kontrolu vstupů i výstupů na několika úrovních.

Aplikovatelnost v praxi a jednoduchost v případě potřeby zaručuje možnost dalších testů nových nástrojových materiálů na jiném pracovišti s relativně nízkými náklady a je to jeden z opomíjených aspektů, které dokáží ušetřit mnoho prostředků nutných k vynaložení při budoucí výzkumné činnosti. Vzhledem k rychle se rozvíjícímu trhu s materiály je jednoduchost jednoznačnou výhodou a dokáže poskytnout rychlé určení vhodnosti konkrétních nástrojových materiálů pro tento účel obrábění.

3.2 Použité technické prostředky

Kapitola shrnuje všechny technické prostředky použité pro experiment.

3.2.1 Stroje

Strojem použitým pro experiment je CNC frézka *MCV 750 A*. Jedná se o poměrně starší stroj, který má tři programovatelné osy. Je však stále schopen výroby s přesností až na 0,02 mm. V dokumentaci ke stroji lze vyčíst následující skutečnosti. „Obráběcí centrum *MCV 750 A* je určeno pro náročné práce v kusové i sériové výrobě. Provádí operace vrtání, vystružování, vyvrtávání, frézování a řezání závitů. Je standardně určeno pro obrábění dílců z oceli, barevných kovů a plastů upnutých na pracovním stole.“ Všechny tyto vlastnosti odpovídají požadavkům pro daný experiment.

V tabulce Tab. 7 jsou oficiální parametry stroje *MCV 750 A*, které prezentuje výrobce.

MAS MCV 750A			Provedení		
			ISO	HSK	
Stůl	Upínací plocha stolu		1000x500 [mm]		
	Max. zatížení stolu		450 [kg]		
Posuvy	Dráha pojezdu	X	750 [mm]		
		Y	500 [mm]		
		Z	500 [mm]		
	Vzdálenost upínací plochy od čela vřetena		150-650 [mm]	200-700 [mm]	
	Rychloposuv	X	45 [m/min]		
		Y	45 [m/min]		
		Z	45 [m/min]		
	Zrychlení	X	2.5 [m/s ²]		
		Y	2.5 [m/s ²]		
		Z	3 [m/s ²]		
Pracovní posuv		1-15000 [mm/min]			
Vřeteno	Jmenovitý výkon		11,5 [kW]		
	Rozsah otáček		20-13000 [1/min]		
	Průměr čelních ložisek		70 [mm]		
Zásobník nástrojů	Počet nástrojů		20		
	Max. hmotnost nástroje		6 [kg]		
	Čas výměny tříska-tříška sousedního nástroje		5.5 [sec]		
Elektrické připojení	Celkový jmenovitý příkon stroje		30 [kVA]		
	Napětí AC		3x400 [V]		
Hmotnost stroje	Stroj s elektroskříní a zásobníkem nástrojů		4900 [Kg]		

Tab. 7 - Charakteristika stroje *MCV 750A*

K samotné stavbě a mechanismům stroje výrobce uvádí následující informace:

„Základ stroje tvoří lože. Po loži přejíždějí saně (osa Y) po kterých se pohybuje stůl (osa X). Stůl slouží k upnutí obráběného dílce. V zadní části lože je plocha pro stojan, po kterém se pohybuje vřeteník (osa Z). Pohony posuvů jsou ve všech osách zajištěny digitálními regulačními servopohony¹³, které jsou připojeny spojkami na kuličkové šrouby. Vřeteno je vybaveno středovým upínáním nástrojů a alternativně kuželem *ISO 40, HSK 63 A*. Pohon vřetena je zajištěn regulačním vestavěným motorem s vlastním okruhem kapalinového chlazení. Obráběcí centrum má standardně rotační zásobník pro 20 nástrojů. Ovládání zásobníku nástrojů, stejně jako uvolňování nástrojů ve vřetenu, je pneumatické. Kryty pracovního prostoru se zasouvacími dveřmi zabráňují rozstříku chladicí kapaliny od středového či vnějšího chlazení nástrojů. Třísky a chladicí kapalina jsou po skluzech vany pracovního prostoru odváděny do dopravníku třísek, nebo vany, které jsou zasunuty do otvoru středem lože ve směru pohybu stolu (osa X).“



Obr. 12 - Stroj MCV 750-A

¹³Termín digitální regulační servopohony je uveden v originální příručce výrobce

3.2.2 Nástroje

Geometrie vrtáků vychází z obecných doporučení pro vrtáky do tvrdých superslitin. Tato doporučení jsou zmíněna v kapitole č. 2.3 a již vybroušený vrták je vidět na Obr. 13. U vrtáku je vybroušen vrcholový úhel 130° , stoupání šroubovice má hodnotu 30° a šířka fazety je 0,7 mm. Příčné ostří je podbroušeno kvůli minimalizaci negativního efektu plastických deformací v oblasti osy nástroje. Každý jednotlivý nástroj byl před experimentem laserem označen unikátním popiskem pro případné dohledání a archivaci vzorků (viz. Obr. 14). Popisky také zabezpečují rychlou orientaci a nezaměnitelnost vzorků při externě zadávaných analýzách.

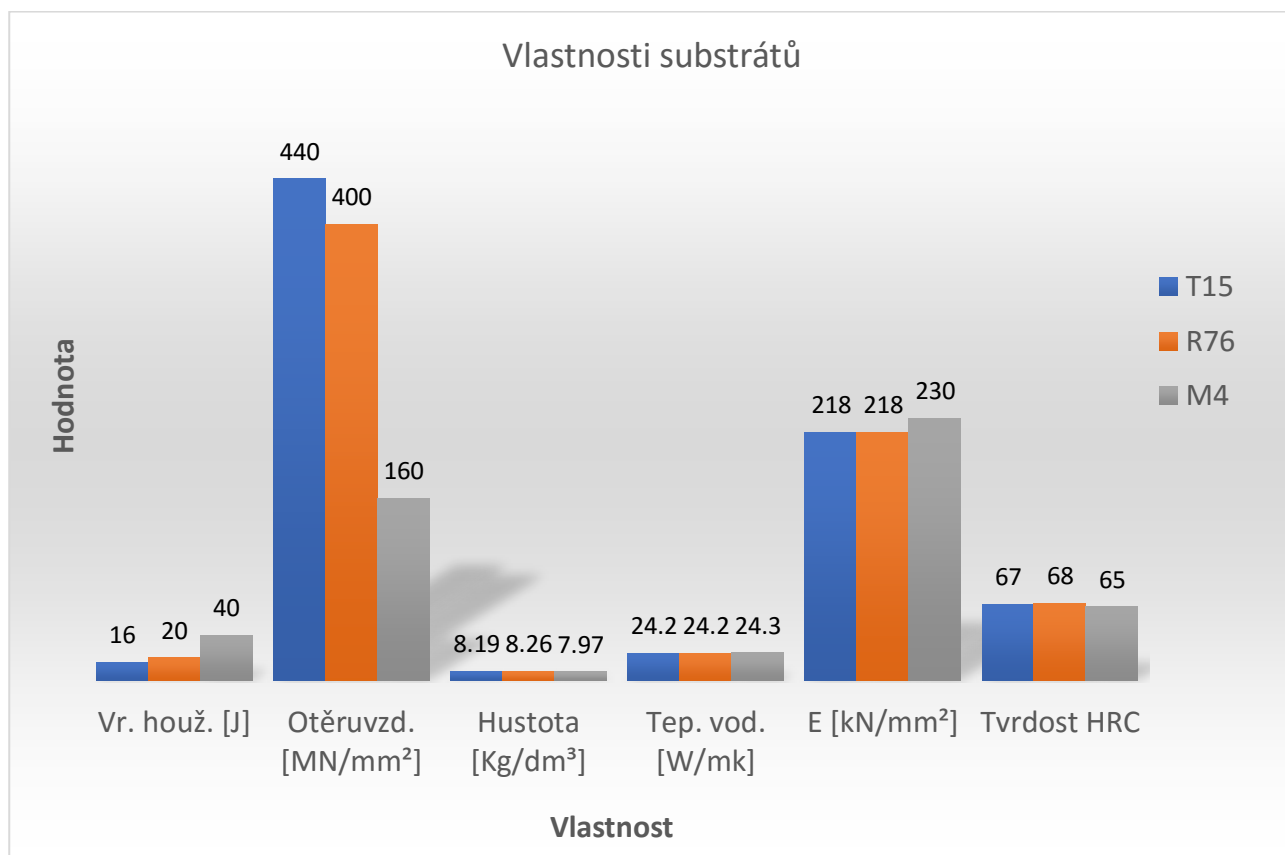


Obr. 13 - Vybroušený vrták připravený pro experiment



Obr. 14 - Označení nástrojů laserem

Použité nástroje byly vyrobeny ze tří testovaných substrátů (*R76*, *T15* a *M4*), jejichž detailní specifikace je uvedena v přílohách č. 1, č. 2 a č. 3 na konci diplomové práce. Jedná se o substráty vyrobené technologií slinování práškové nástrojové oceli a v grafu č. 1 jsou vzájemně porovnány jejich charakteristické mechanické a fyzikální vlastnosti. Mechanické vlastnosti se samozřejmě odvíjí od druhu a způsobu tepelného zpracování vzorků. Na polovinu nástrojů určených pro experiment byla deponována ochranná tenká vrstva běžně používaná pro tento účel aplikace. Povlak je tvořený adhezí vrstvou *TiN*, středovou vrstvou *AlTiN* a vrchní nanokompozitní vrstvou *CrAlSiN*. Povlak *TripleCoating Cr* představuje nejmodernější povlak na trhu, který kombinuje vynikající houževnatost a tvrdost vrstvy *AlTiN* a extrémně vysokou tvrdost nanokompozitní vrstvy *CrAlSiN* [13].



Graf 1 - Charakteristické vlastnosti testovaných substrátů

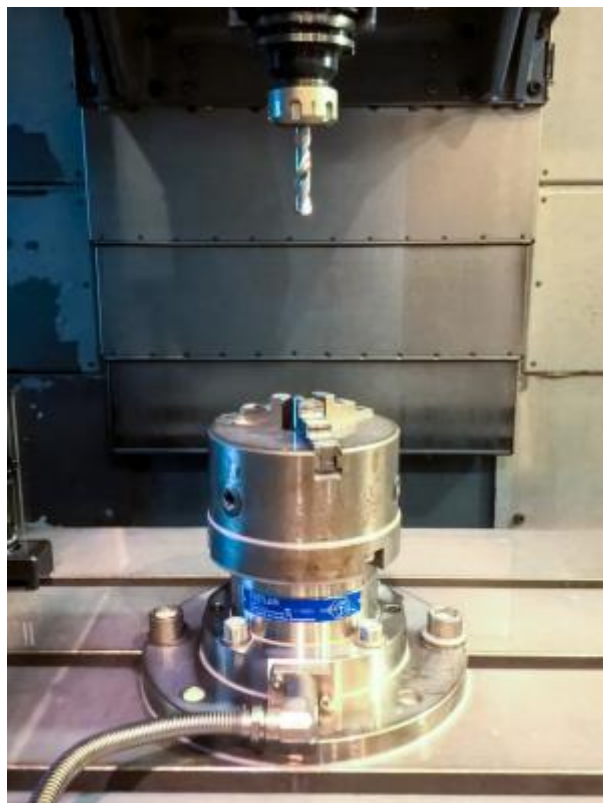
Všechny nástroje také prošly vstupní kontrolou jakosti povrchu břitu před omíláním, po omílání a pro verzi experimentu s nástroji s vrstvou, také po jejich depozici. Bylo tak učiněno z důvodu zajištění kvalitních a bezchybných vstupních parametrů experimentu. Ukázka grafického výstupu kontrolních analýz je vidět na Obr. 15. Vlevo je 3D model břitu a jeho okolí bezprostředně po broušení, uprostřed po omílání a vpravo po omílání a depozici tenké vrstvy. Plocha nad řeznou hranou je plochou hřbetu a plocha pod hranou je plocha čela nástroje. Zaoblení řezného břitu po broušení bylo $7 \mu\text{m}$, vlečným omíláním se upravily řezné nástroje na definované zaoblení břitu $10 \mu\text{m}$. Po depozici se zvětšil poloměr zaoblení na cca $12 \mu\text{m}$. Na břitech po depozici nejsou vidět žádné defekty.



Obr. 15 - 3D analýza břitu

3.2.3 Ostatní technické prostředky

Mezi ostatní technické prostředky lze zařadit statický čtyřsložkový obrobkový dynamometr spolu s univerzálním tříčelistovým sklíčidlem, které je na něj připevněno z důvodu upnutí obrobků po celou dobu experimentu (Obr. 16). Konkrétní údaje o přesnosti, citlivosti, rozsahu a podmínkách, při kterých dynamometr může pracovat, jsou uvedeny v Tab. 8. Systematická chyba výsledků měření této sestavy byla ověřena při dříve uskutečněných testech na tomto pracovišti a je prohlášena za dostatečnou. Pro upnutí vrtáků do vřetene stroje slouží držák nástrojů *HSK 63 A* v kombinaci s přesným kleštinovým systémem upnutí pro válcové nástroje s průměrem 10 mm. Tento systém upnutí je schopen zaručit dostatečnou tuhost i přesnost upnutí a byl také zvolen s ohledem na zkušenosti z dříve uskutečněných experimentů na tomto pracovišti. Samozřejmě sem patří i vybavení potřebné k digitálnímu záznamu řezných sil. Konkrétně se jedná o spojovací uhlíkový kabel, tříkanálový zesilovač, řadič, měřicí kartu pro digitalizaci analogového signálu a počítač se softwarem (Obr. 17). Tříkanálový zesilovač je možno použít, jelikož ze složek sil v osách X a Y je nutné snímat jen jednu. Jedním použitým kanálem jsou zesilovány informace z osy Y, druhým kanálem informace z osy Z a třetím kanálem jsou zesilovány informace o kroutícím momentu.



Obr. 16 - 4-složkový obr. dynamometr Kistler

Parametry				
Složka zatížení	F _x	F _y	F _z	M _z
Max. zatížení	5 kN	5 kN	20 kN	200 Nm
Citlivost	-7,8 pC/N	-7,8 pC/N	-3,5 pC/N	-160 pC/Nm
Max. kombinovaný moment	400 Nm			
Vlastní frekvence	3,1 kHz		6,3 kHz	4,2 kHz
Použitelné na stroji	DMU 65, DMU 40 eVo, MCV 750 A, MASTURN			

Tab. 8 - Parametry použitého dynamometru [14]

Pro odečítání hodnot lineárního opotřebení hřbetu nástrojů je využit optický mikroskop *Multicheck 500* (Obr. 18). V softwaru pro jeho obsluhu je možnost uložení šablon tvaru nových nástrojů a lze tak porovnávat aktuální stav bříty s původním. Software také umožňuje uložení snímků břitů, které jsou dále využity pro vizuální kontrolu a vyhodnocení.



Obr. 17 - Zaznamenávací zařízení pro měření silového zatížení

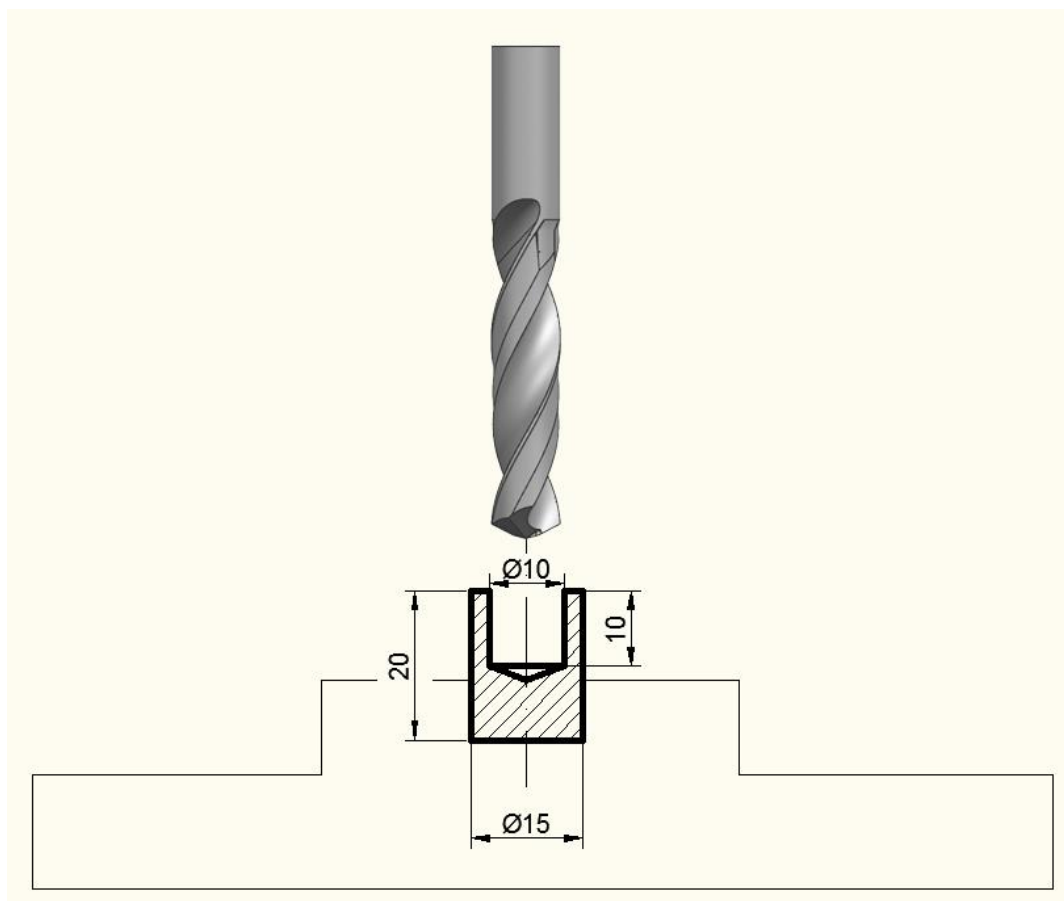


Obr. 18 – Optický mikroskop Multicheck 500 pro vyhodnocování opotřebení s příslušenstvím

3.3 Návrh prvního experimentu

První test je navržen jako test trvanlivosti šroubovitého vrtáku při vrtání děr do plna o průměru 10 mm a hloubce taktéž 10 mm. Tyto základní parametry jsou zvoleny na základě dostupných informací o četnosti vyráběných děr v leteckém průmyslu, kde jsou nejčastěji používány díry právě s těmito rozměry (1 až 2D). Test je proveden s vrtáky vyrobenými z již zmíněných tří substrátů: R76, M4 a T15. První část experimentu je prováděna s nástroji bez tenké vrstvy, druhá část pak s nástroji opatřenými tenkou vrstvou viz. kapitola 3.2.2.

Základem testu je tedy běžná výroba děr se specifickými reznými podmínkami na konvenční tři-osé frézce MCV 750 A. Při výrobě každé jednotlivé díry je zaznamenáván průběh krouťícího momentu M_z a sil v osách Z a Y (orientace os odpovídá orientaci dle pravidla pravé ruky). Po každé vyrobené díře je vrták podroben kontrole na optickém mikroskopu, kde je změřena a zaznamenána hodnota opotřebení hřbetu na pravém břitu¹⁴. Takto probíhá test až do překročení kritériálního opotřebení hřbetu ($VB_{krit.}$), který je stanoven na 0,150 mm. V případě, že je geometrie zásadně poškozena například vyštípnutím, je testovaný vrták prohlášen za vrták, který překročil mezní hodnotu opotřebení. Na Obr. 19 je základní schéma prvního testu.



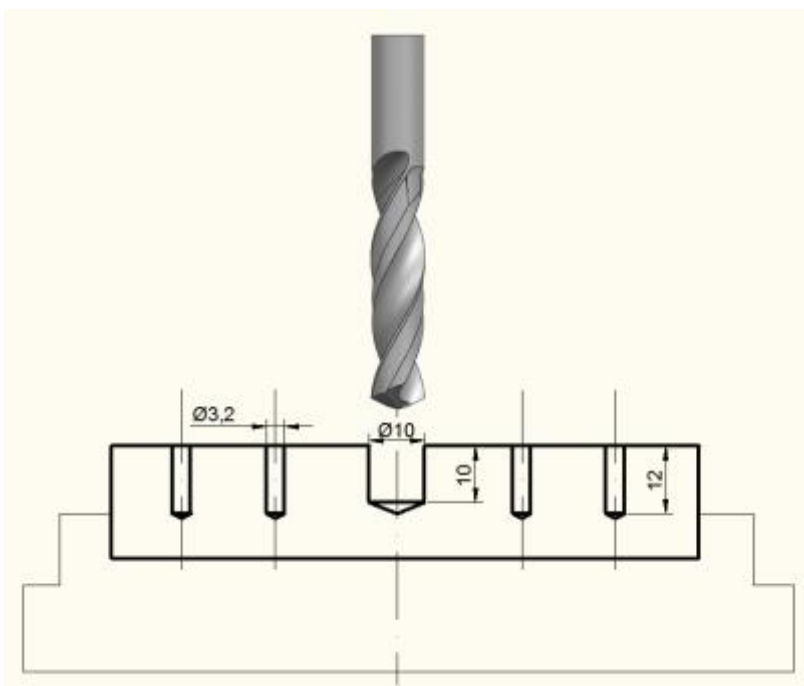
Obr. 19 - Schéma prvního experimentu

¹⁴ Břit, který byl prohlášen za pravý (u všech testovacích vrtáků břit na straně, kde je označení laserem)

3.4 Návrh druhého experimentu

Druhý test je navržen jako test trvanlivosti šroubovitého vrtáku při vrtání děr o průměru 10 mm a hloubce taktéž 10 mm, ovšem s předvrtáním. Předvrtány jsou díry o průměru 3,2 mm. Test je proveden s vrtáky vyrobenými ze tří substrátů: R76, M4 a T15. První část experimentu je prováděna s nástroji bez tenké vrstvy, druhá část pak s nástroji opatřenými tenkou vrstvou viz. kapitola 3.2.2.

Základem testu je tedy opět výroba děr se specifickými řeznými podmínkami na konvenční tří-osé frézce *MCV 750 A*. Jedinou změnou oproti předchozímu testu jsou předvrtané díry o průměru 3,2 mm. Při výrobě každé jednotlivé díry je zaznamenáván průběh kroutícího momentu M_z a sil v osách Z a Y (orientace os odpovídá orientaci dle pravidla pravé ruky). Po každé vyrobené díře je vrták podroben kontrole na optickém mikroskopu, kde je změřena a zaznamenána hodnota opotřebení na pravém břitu¹⁵. Takto probíhá test až do překročení kritériálního opotřebení hřbetu břitu VB, který je stanoven na 0,150 mm. V případě, že je geometrie zásadně poškozena například vyštípnutím, je testovaný vrták prohlášen za vrták, který překročil mezní hodnotu opotřebení. S poškozením břitu v místě styku přechodové oblasti mezi plným materiálem a předvrtanou dírou je počítáno a poškození v této oblasti není důvodem pro ukončení testu. Na Obr. 20 je základní schéma druhého testu.



Obr. 20 - Schéma druhého experimentu

Na Obr. 20 je základní schéma druhého testu.

3.5 Přehled prováděných experimentů

Pro přehlednost jsou jednotlivé podmínky experimentů uvedeny v Tab. 9.

POŘADÍ EXPERIMENTU	VERZE EXPERIMENTU	ŘEZNÉ PODMÍNKY	GEOMETRIE NÁSTROJE
EXPERIMENT I. (Do plna)	BEZ VRSTVY (1-A)	KONSTANTNÍ	KONSTANTNÍ
	S VRSTVOU (1-B)		
EXPERIMENT II. (S předvrtáním)	BEZ VRSTVY (2-A)		
	S VRSTVOU (2-B)		

Tab. 9 - Přehled navržených testů

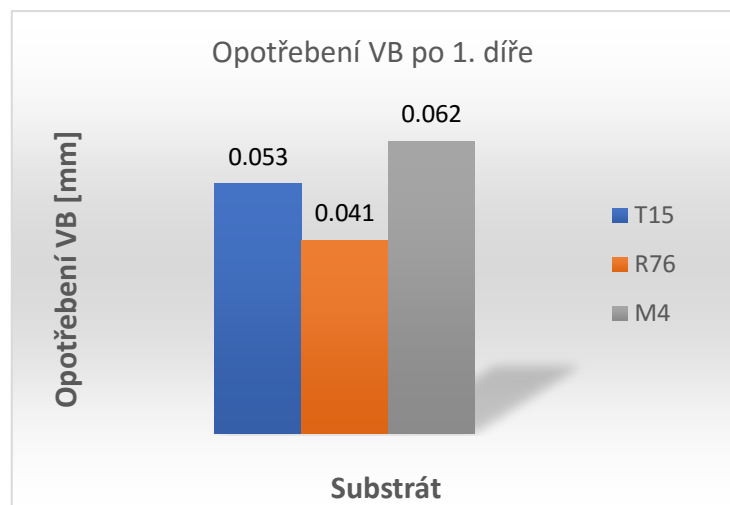
¹⁵ Břit, který byl prohlášen za pravý (u všech testovacích vrtáků břit na straně, kde je označení laserem)

4 Vyhodnocení výsledků

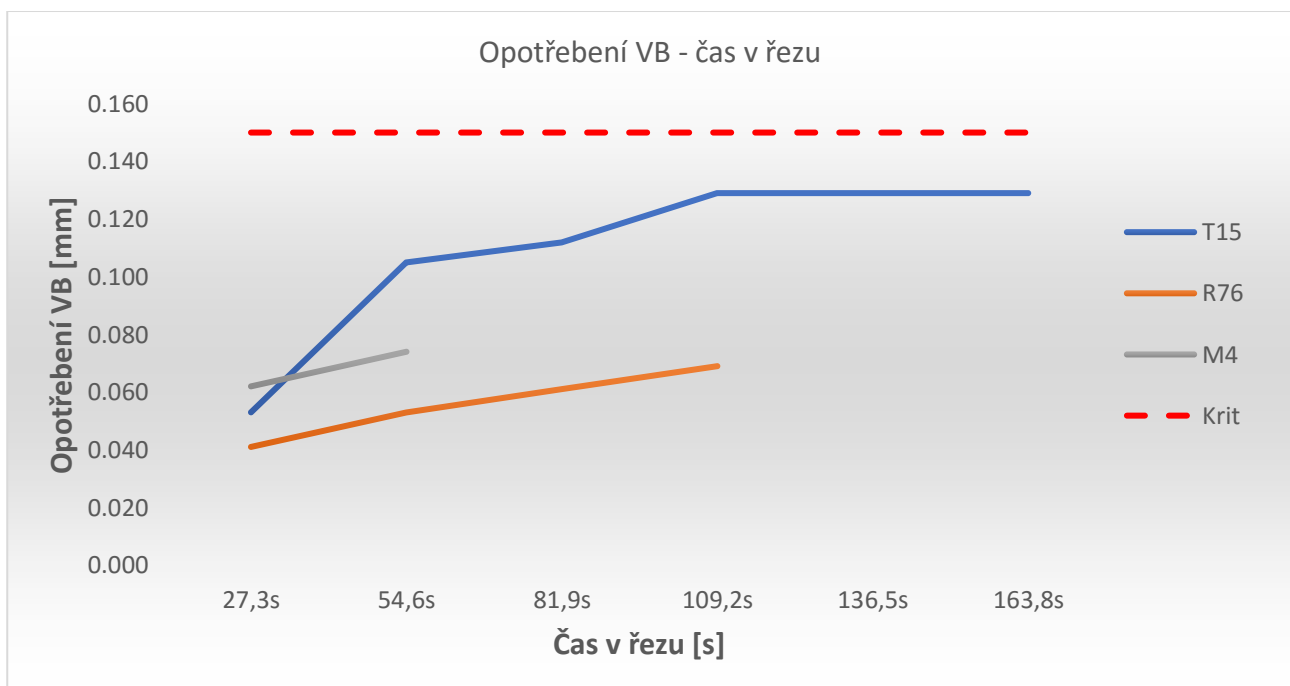
Tato kapitola je nejobsáhlejší částí práce a obsahuje všechny dílčí i celkové výsledky experimentů. Je zde zmíněn také důvod nutnosti návrhu druhého experimentu a vysvětlení jednotlivých souvislostí mezi výsledky.

4.1 Experiment (1-A)

Jedná se o první experiment (verze A), tedy vrtání do plna (nástroje bez ochranné tenké vrstvy). Na grafu č. 2 jsou vidět hodnoty opotřebení hřbetu po vyvrtání první díry, kde lze vidět rozdíly mezi substráty v řádech desítek procent. Nejlépe se s podmínkami vyrovnal substrát R76, druhým nejmeně opotřebovaným nástrojem byl nástroj ze substrátu T15 a nejhůře tyto podmínky zvládl materiál s označením M4. Při pohledu na graf č. 3 už výsledky tak jednoznačné nejsou. Nejvyšší celkovou trvanlivost měl zhruba o 30 % materiál T15, ačkoli po první díře měl druhou nejvyšší hodnotu opotřebení. Oproti tomu materiál R76 vydržel v řezu kratší dobu (ale s výrazně nižší hodnotou opotřebení). Nejkratší dobu pak vydržel v řezu substrát M4. Který vykazoval výrazně horší výsledky v obou případech.

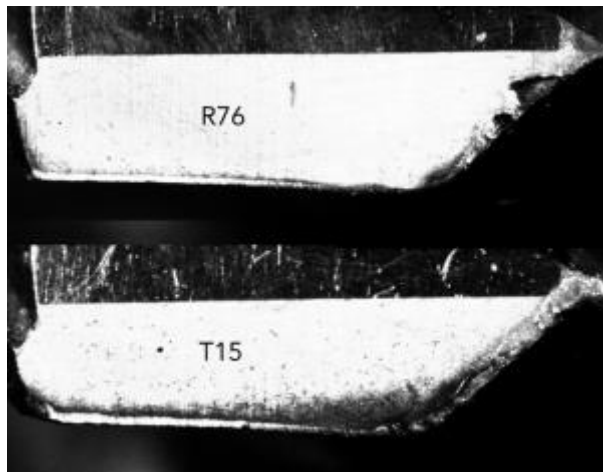


Graf 2 - Opotřebení hřbetu po 1. díře (experiment 1-A)



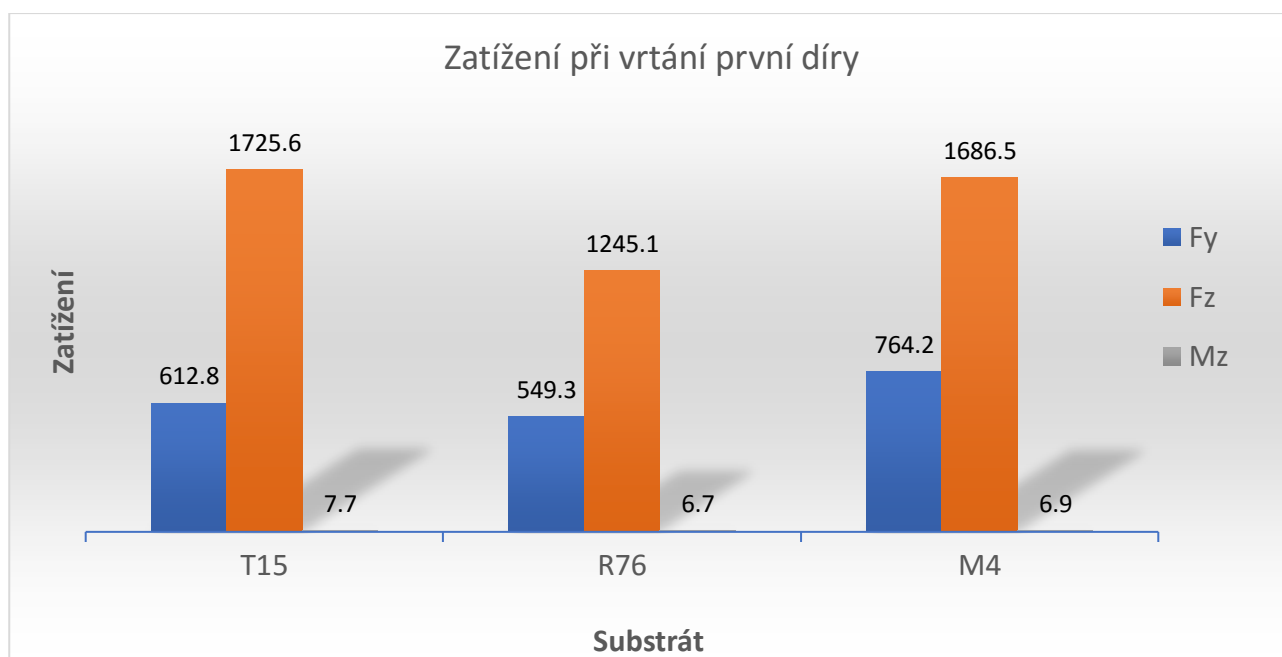
Graf 3 - Celková trvanlivost nástrojů (experiment 1-A)

Graf č. 3 také ukazuje, že ani jeden vrták nepřekročil kritériální hodnotu opotřebení hřbetu, avšak trvanlivosti všech nástrojů byly ukončeny. Snímek břitů nástrojů ze substrátu *R76* a *T15* (viz. Obr. 21) ukazuje, že při experimentu docházelo k výraznému porušování geometrie v oblasti příčného ostří, a v takových případech musely být nástroje prohlášeny za nevyhovující. Je při tom evidentní, že materiál *R76* má podstatně lineárnější opotřebení na břitu než materiál *T15*. Toto je velmi důležitý poznatek, jelikož skutečnou hodnotu odolnosti substrátů vůči lineárnímu opotřebení zkresluje ovlivňující činitel v podobě „odštípování“ příčného ostří. To v případě vrtání velmi tvrdých superslitin může být problém především velice důležité a problematické geometrie příčného ostří, kterou je nutno optimalizovat a nikoli substrátu jako takového. Tomuto faktu bude věnována pozornost v podkapitole „Shrnutí prvního experimentu“.



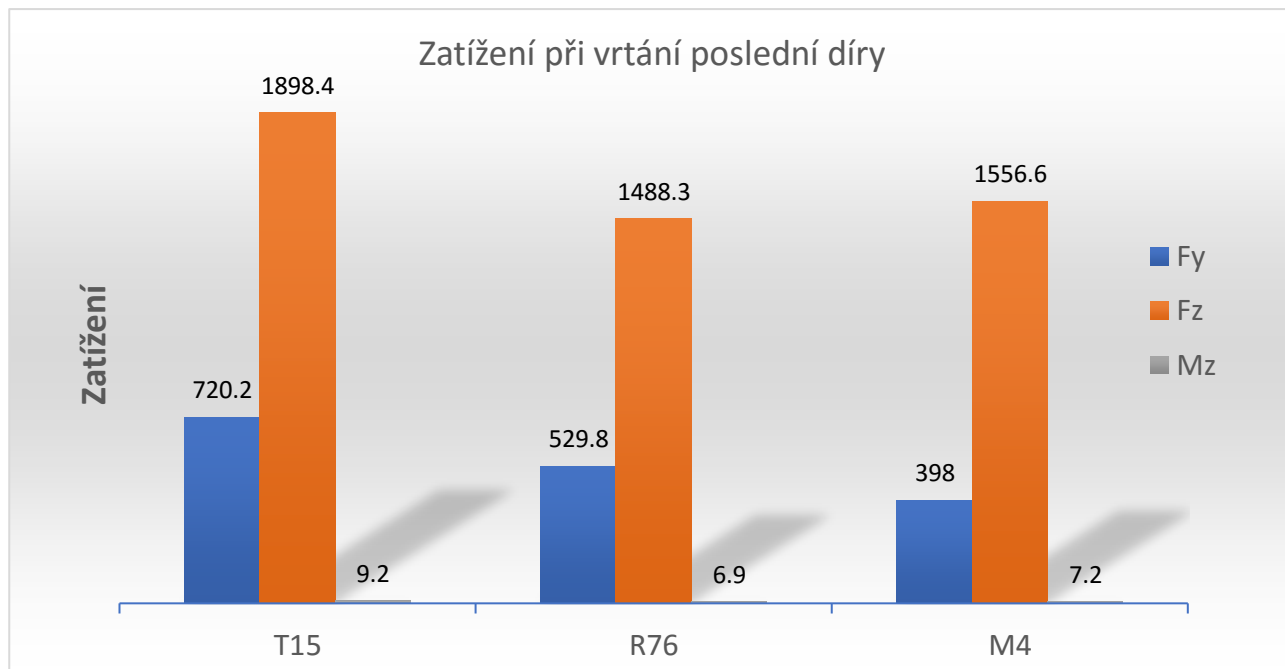
Obr. 21 - Destruovaná geometrie nástrojů

Zvýšenou pozornost si zaslouží i chování vrtáku z materiálu *M4*, kdy při vrtání nedochází k optimálnímu lámání třísky, ba je dokonce nalepována na břit v dlouhém vinutém tvaru. Dalším faktorem hodnocení je silové zatížení nástrojů při první a poslední vyvrtané díře. Hodnoty dosažené při prvním testu jsou k vidění v grafu č. 4 a v grafu č. 5. Hodnoty zatížení M_z , F_y i F_z měl výrazně nejnižší materiál s označením *R76*. Porovnáním hodnot zatížení při vrtání první díry s hodnotami zatížení při vrtání poslední díry, kdy mohou být ovšem výsledky zčásti zkresleny právě změnou geometrie lze říci, že tento materiál vykazoval nejnižší hodnoty zatížení i v tomto případě (viz. graf č. 5).



Graf 4 - Zatížení při vrtání první díry (experiment 1-A)

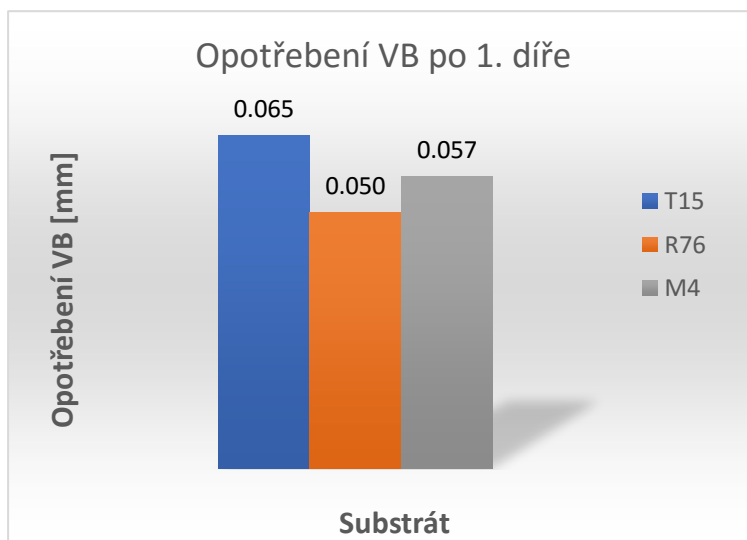
Pouze u složky F_y měl nejnižší hodnoty substrát $M4$.



Graf 5 - Zatížení při vrtání poslední díry (experiment 1-A)

4.2 Experiment (1-B)

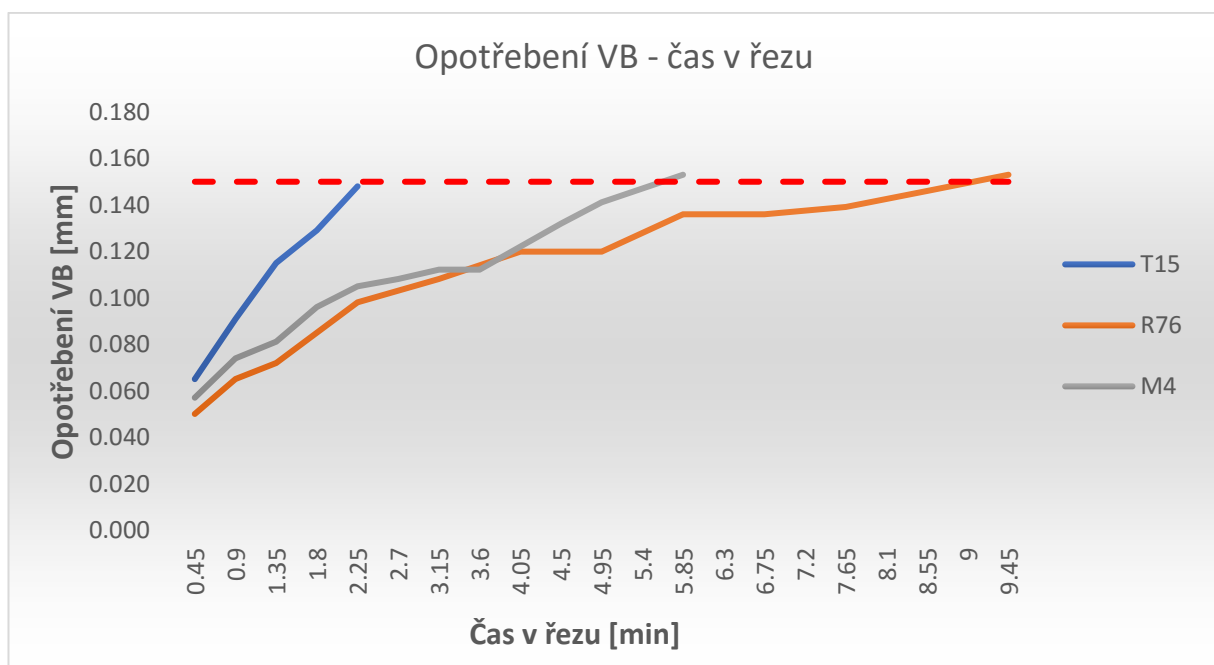
Jedná se o první experiment (verze B), tedy vrtání do plna (nástroje opatřené tenkou vrstvou). Vzhledem k použití tenké vrstvy je předpoklad prodloužení celkové trvanlivosti nástrojů a zároveň snížení řezných sil, jelikož vrstva zlepšuje kluzné vlastnosti nástroje a měla by ochránit geometrii břitu před destrukcí. Graf č. 6 ukazuje, že substrát $R76$ má opět nejnižší hodnotu opotřebení po vyvrtání první díry a rozdíly mezi všemi třemi nástroji se snížily. Největší opotřebení tentokrát vykazoval nástroj z materiálu $T15$. Absolutní hodnoty opotřebení jsou však srovnatelné, nebo dokonce vyšší než u nástrojů bez tenké vrstvy a nepotvrdil se tak předpoklad snížení opotřebení. V tuto chvíli je dobré si uvědomit, že pro správný výklad výsledků experimentu je nutné nahlížet na výsledné hodnoty v širších souvislostech. Jednotlivé výsledky vytržené z kontextu mohou být totiž zavádějící.



Graf 6 - Opotřebení hřbetu po první díře (experiment 1-B)

Širší souvislosti poskytne graf č. 7, na kterém je vidět, že přes poměrně vysoké opotřebení po první díře je celková trvanlivost skutečně několikanásobně větší. Vysokou počáteční míru opotřebení lze tedy přikládat jevu známému jako „zařiznutí nástroje“, kdy v řezném procesu dochází k prvotnímu přetvoření mikro-geometrie nástroje a poté se systém opotřebení opět stabilizuje. Na první pohled je zřejmé, že u všech nástrojů je dosaženo kritériální hodnoty lineárního opotřebení, a tak lze říci, že díky aplikaci tenké vrstvy došlo ke zpevnění a stabilizaci geometrie nástroje, jelikož není žádný z testovaných nástrojů prohlášen za nevyhovující předčasně.

Překvapivá je celková trvanlivost, ale i průběh opotřebení nástroje z *T15*. Oproti výsledkům v první verzi experimentu, kde byl tento substrát jednoznačně nejlepší s celkovou trvanlivostí 2,73 min je v tomto testu naopak jasně nejhorší s dosažením meze trvanlivosti již po 2,25 min (méně než u nástroje bez tenké vrstvy). Výrazně lépe na tom je substrát *M4* s trvanlivostí 5,85 min a svými výsledky dominuje opět nástroj vyrobený z práškové rychlořezné oceli *R76*, který dosáhl kritériální hodnoty opotřebení po více než devíti minutách v řezu.



Graf 7 - Celkové opotřebení hřbetu (experiment 1-B)

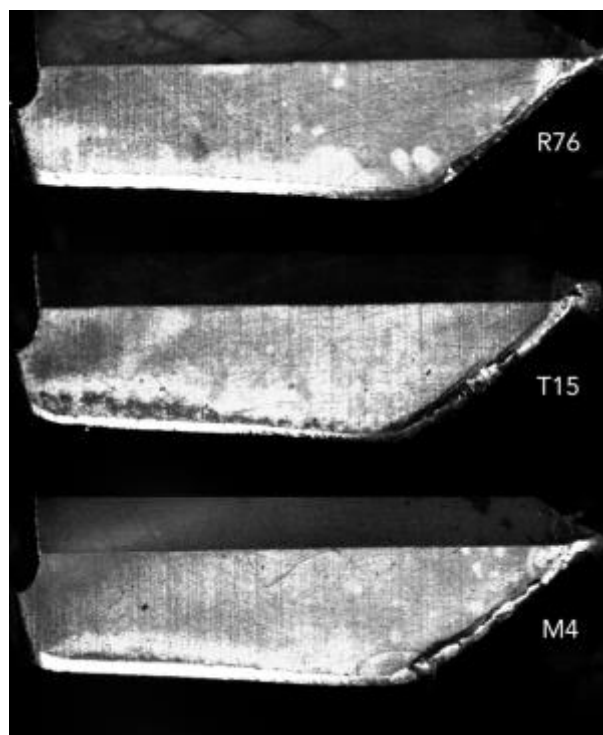
Výsledky z grafu č. 7 je také možné interpretovat jako výsledky ovlivněné dalším faktorem, který má důležitý význam pro aplikaci materiálů v praxi a tím je interakce substrátu s vrstvou. U substrátů *M4* a *R76* je vidět jednoznačný přínos v podobě několikanásobného navýšení trvanlivosti, přičemž u substrátu *T15* tomu tak rozhodně není. Explicitní vliv tenké vrstvy na výsledky celkové trvanlivosti vrtáků je vyjádřen v tabulce Tab. 10. Je tedy zřejmé, že největší přínos vrstvy zaznamenal substrát *M4*, který měl v předchozím testu obecně nejhorší výsledky.

Substrát	Trvanlivost bez vrstvy [min]	Trvanlivost s vrstvou [min]	Rozdíl [%]
T15	2,73	2,25	-17,58
M4	0,91	5,85	+642,86
R76	1,82	9,45	+519,23

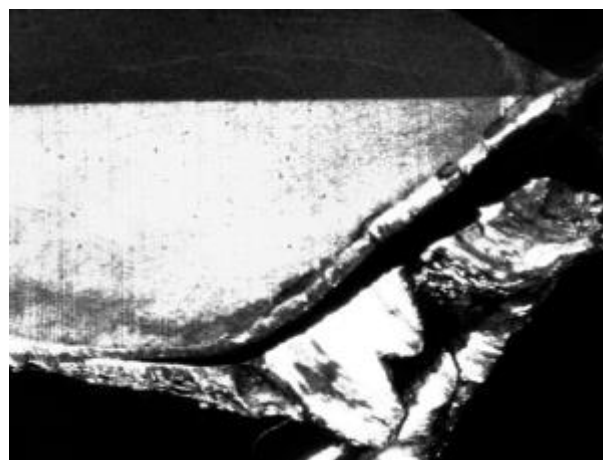
Tab. 10 - Vliv tenké vrstvy na výsledky trvanlivosti (1-A; 1-B)

Podívejme se nyní na porovnání stavu břitů po dosažení mezního opotřebení (viz. Obr. 22). Vizuálně nejhůře vypadá prostřední vzorek, který má viditelně největší úbytek materiálu z břitu i příčného ostří, a navíc vydržel v řezném procesu nejkratší dobu. První vzorek má vizuálně nejlepší výsledky, a navíc vydržel v řezu podstatně déle než oba zbylé vzorky. Opět se proto substrát R76 jeví jako nevhodnější materiál pro vrtání Inconelu 718. Spodní vzorek má viditelně poškozenou oblast příčného ostří a v průběhu testu se na břit tohoto materiálu opět nalepovala tříška, jak lze vidět na dalším obrázku (Obr. 23). Vzhledem k tomu, že se jedná o opakovaný jev u stejného substrátu, je zde opodstatněný důvod k hlubšímu zamyšlení se nad touto problematikou. Zachování této vlastnosti i při obrábění nástrojem s tenkou vrstvou totiž poukazuje na potenciálně velmi důležitou informaci o přenosu klíčových vlastností substrátu na celý proces vrtání. To by znamenalo, že vliv substrátu na proces vrtání Inconelu 718 je značný a aplikace tenké vrstvy nedokáže přenosu těchto vlastností efektivně zabránit. Detailněji bude tato hypotéza rozebrána v kapitole 4.5 .

Nyní zpět k vyhodnocení experimentu 1-B, konkrétně pak k vyhodnocení zatěžujících řezných sil. Zásadní změna oproti předchozímu experimentu je výrazné zvýšení sil v ose vrtáku (F_z) a zároveň snížení sil kolmých na osu (F_y). To může být zapříčiněno mnoha různými faktory a tato skutečnost přímo odporuje všem predikcím vycházejících z předpokládaného pozitivního přínosu tenké vrstvy. Jako jednou z variant, která mohla zapříčinit takto markantní rozdíl v silovém zatížení lze považovat nevhodnou geometrii příčného ostří, která není optimalizována a při obrábění vrtákem bez depozice ovšem dokáže přetransformovat svůj tvar na silově výhodnější.

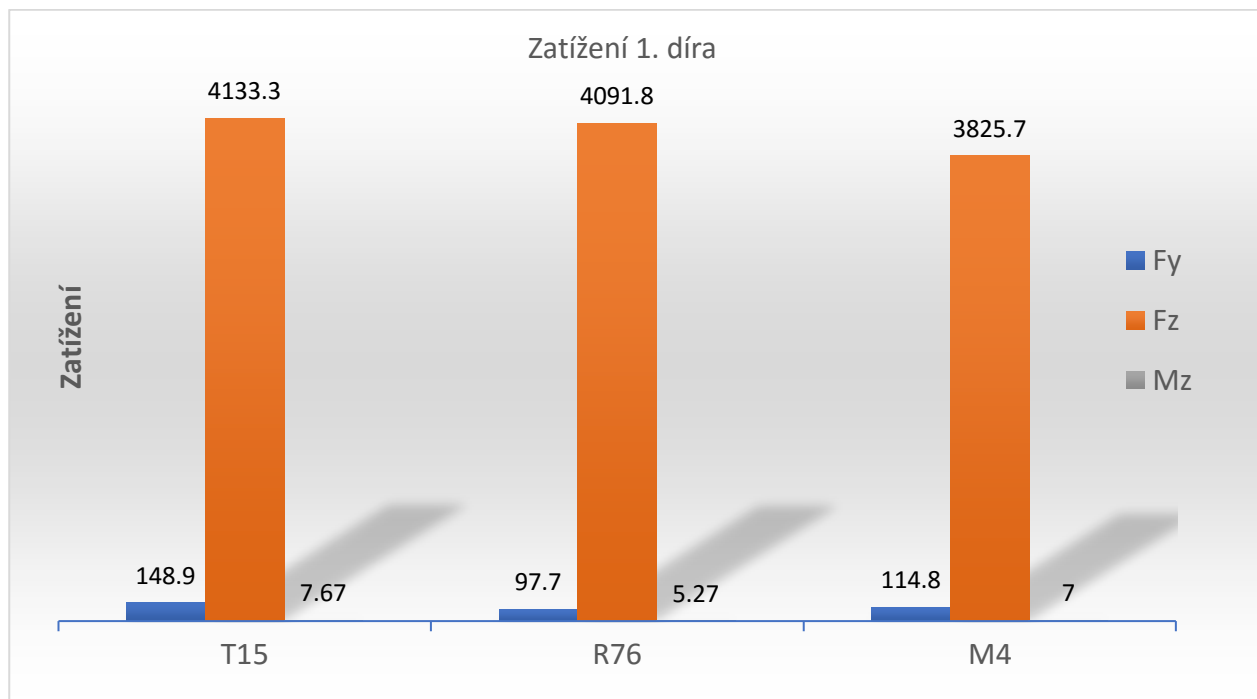


Obr. 22 - Stav břitů při dosažení mezního opotřebení (1-B)

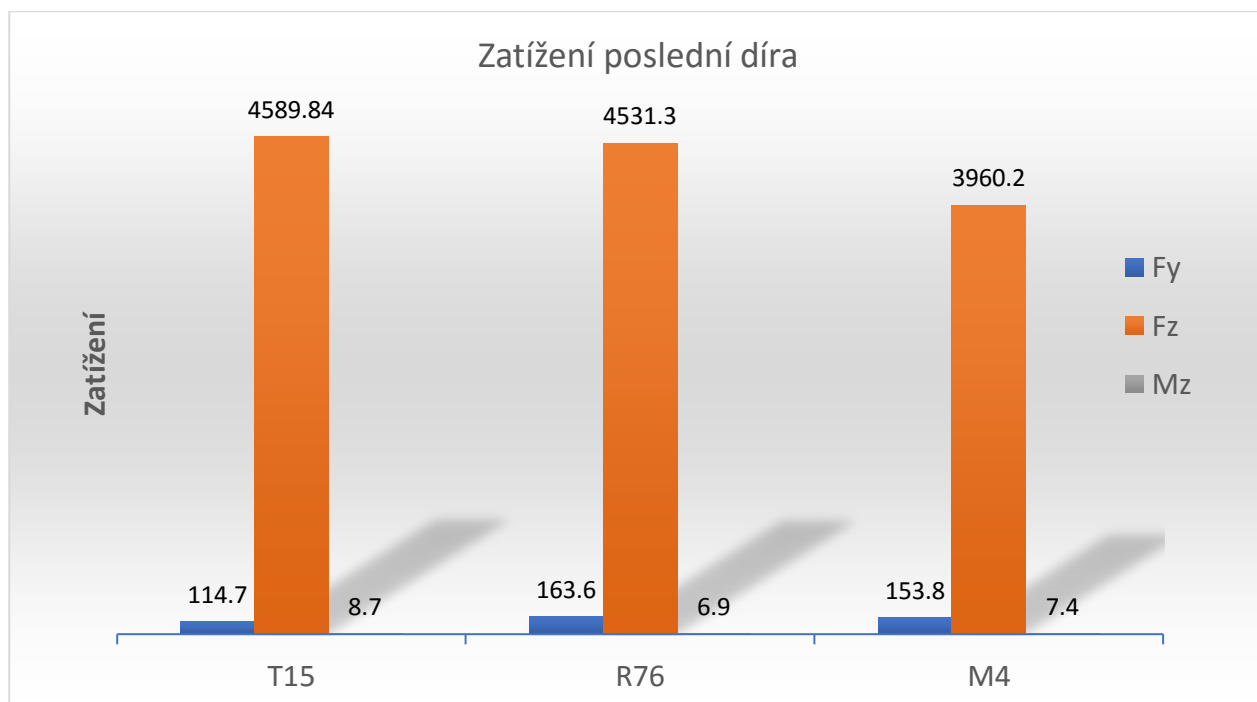


Obr. 23 - Nalepení tříšky na nástroj z M4 (1-B)

U vrtáků s depozicí je transformaci tvaru ostří zabráněno právě vlivem pevné tenké vrstvy, která dokáže geometrii zachovat. Dokáže ji zachovat i za přítomnosti vyšších řezných sil zatěžujících nástroj tak, jak byla vybroušena, a to je dle mého názoru důvodem diskontinuity výsledků měření řezných sil vůči výsledkům první verze experimentu.



Graf 8 - Zatížení při první díře (I-B)



Graf 9 - Zatížení při poslední díře (I-B)

Shrnutí prvního experimentu

V prvním experimentu jsou vyhodnoceny následující hodnoty:

- Opotřebení hřbetu po první díře.
- Celková trvanlivost nástroje.
- Vizuální stav bříty.
- Silové zatížení při první díře.
- Silové zatížení při poslední díře.

Vyhodnocení opotřebení hřbetu po první díře je důležité zejména proto, že výsledky jsou nejméně ovlivněné změnou geometrie nástroje a tím pádem porovnávají substráty ve srovnatelných podmínkách (všechny substráty mají na počátku zaručeny stejné podmínky). Hodnoty opotřebení bříty v průběhu celého experimentu až do překročení stanovené kritériální hodnoty vytvářejí křivku celkové trvanlivosti nástrojů, tedy nejdůležitější faktor pro praktickou aplikaci vrtáku. Vizuální stav bříty umožňuje snadno a rychle hledat souvislosti mezi chováním nástrojů v řezu a všemi dalšími aspekty. Silové zatížení při vrtání první a poslední díry poukazuje hlavně na vliv a míru změny geometrie (nárůstu opotřebení).

Předběžné ukončení trvanlivostí v první části experimentu kvůli vyštípnutí nástrojů v oblasti příčného ostří a diskontinuita hodnot silového zatížení s druhou částí experimentu je dle mého názoru jasným projevem vlivu geometrie příčného ostří na výsledky experimentu. Tento fakt pokládám za problematický a podle mého soudu výrazně snižuje reprodukovatelnost výsledků. Smyslem experimentu je explicitní určení vlivu substrátu na trvanlivost šroubových vrtáků při obrábění Inconelu 718 a proto bylo rozhodnuto učinit druhý experiment. Ve druhém experimentu je vliv příčného ostří eliminován předvrtáním děr o průměru větším, než je právě tato problematická oblast (Obr. 24). Toto opatření umožní úběr materiálu pouze v méně problematické oblasti s nenulovou řeznou rychlostí, a to by mělo zajistit relevantní informace o vlivu samotného substrátu na opotřebení nástroje, respektive jeho trvanlivost.

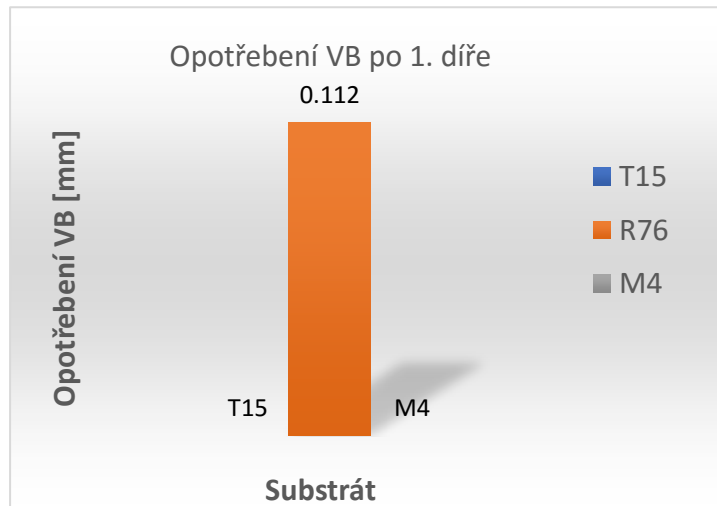


Obr. 24 - Předvrtání děr

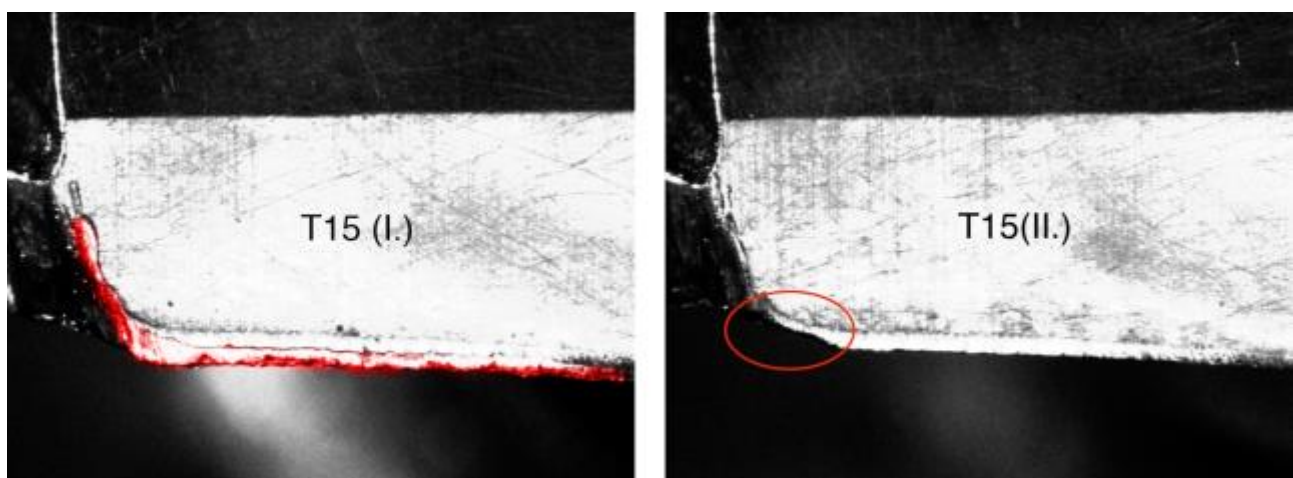
4.3 Experiment (2-A)

Jedná se o druhý experiment (A), tedy vrtání s předvrtanou dírou (nástroje bez ochranné tenké vrstvy).

Jak bylo zmíněno na konci předchozí kapitoly, lze u tohoto experimentu očekávat relevantnější informace přímo o vlivu substrátu na trvanlivost nástroje a jedná se pouze o optimalizaci experimentu předešlého, přičemž všechny ostatní podmínky jsou totožné. Zachování všech ostatních podmínek umožňuje částečnou přenositelnost výsledků a vzájemnou komparaci obou experimentů. Hned první výsledky značí výrazný rozdíl v hodnotách dosažených stejnými substráty. Jediným materiálem, který měl měřitelné lineární opotřebení po první díře byl substrát *R76* a hodnoty jeho opotřebení po první díře přesahovali dvojnásobek hodnot z předchozího experimentu vrtání „do plna“ (viz. graf č. 10). Podíváme-li se na snímky zbylých dvou nástrojů tak zjistíme, že u nástroje z *T15* došlo při vrtání první díry k vyštípnutí břitu a nalepení třísky po celé jeho délce (Obr. 25 - vlevo). Obecně měl však nástroj z materiálu *T15* méně výrazné a rovnoměrnější opotřebení než nástroj z *M4*, jak dokazuje snímek pořízený po vyvrtání druhé díry (Obr. 25 - vpravo). U nástroje vyrobeného ze substrátu *M4* došlo k vyštípnutí břitu ve stejném místě jako u *T15*, ale navíc také k vytvoření nárůstku (Obr. 26). Rozdíly mezi dosaženými výsledky substrátů se rapidně zvětšily a nejlépe podmínky testu opět zvládl materiál *R76*. Evidentní je také rozdílná interakce mezi substráty a obráběným materiálem. Zcela logicky má celková trvanlivost smysl vyhodnocovat pouze u nástroje, který vydržel více než jednu díru bez destrukce geometrie.

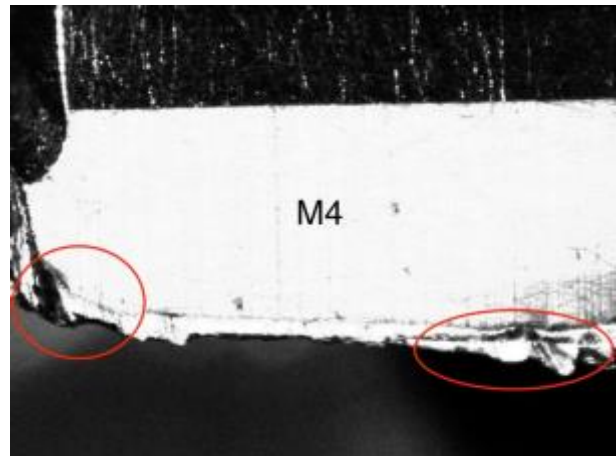


Graf 10 - Opotřebení po první díře (2-A)

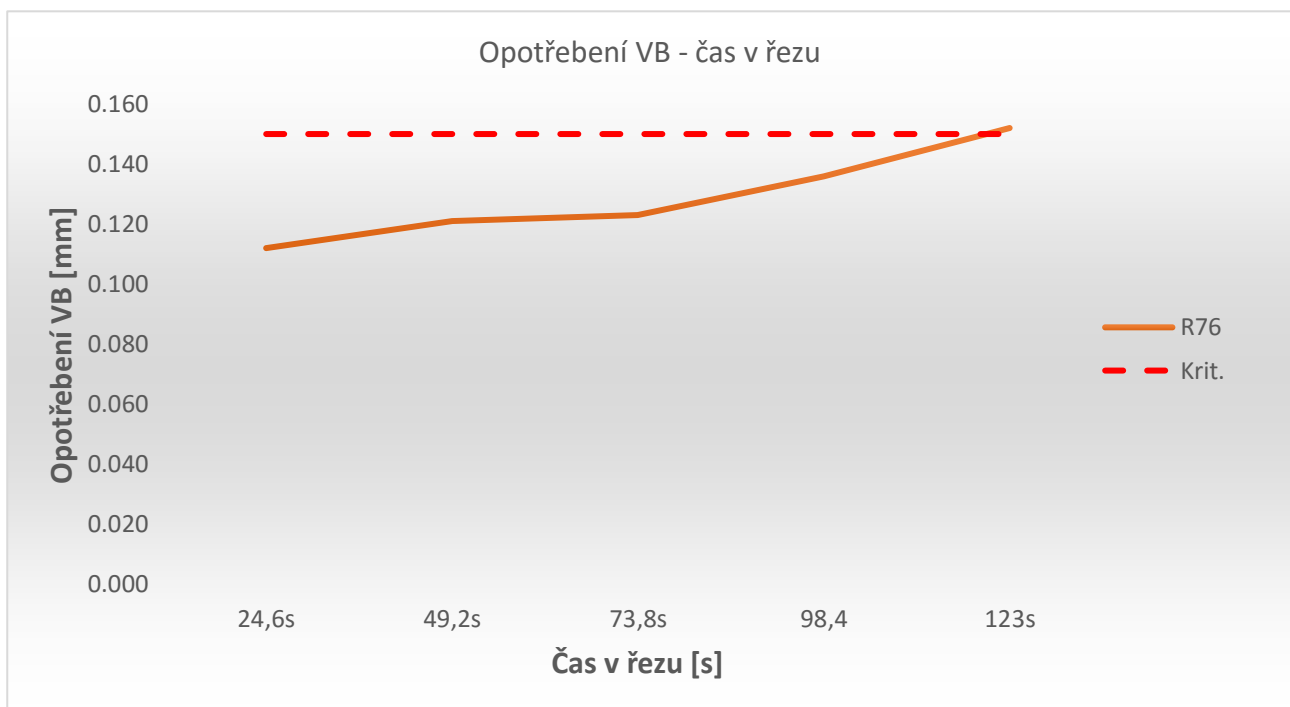


Obr. 25 - Břit nástroje z materiálu *T15* po 1. díře (vlevo) a po 2. díře (vpravo). Experiment 2-A

V porovnání s prvním experimentem je na výsledcích v grafu č. 11 možnost vidět výrazně vyšší počáteční opotřebení břitu nástroje a na rozdíl od degresivního průběhu opotřebení v prvním testu je tentokrát křivka popisující partikulární hodnoty opotřebení lehce progresivní. Je však nutné podotknout, že v prvním experimentu byl test tohoto nástroje přerušen předčasně kvůli fatálnímu porušení geometrie příčného ostří a není tak možné průběhy plnohodnotně porovnat. Při tomto experimentu dosáhl nástroj kritériální hodnoty lineárního opotřebení hřbetu bez problémů a v řezu vydržel o 13,8 sekundy déle. Přestože nástroje z materiálu T15 a M4 nezvládly ve stanovených řezných podmínkách vyvrtat ani jednu díru dle specifikovaných požadavků, substrát R76 opět prokázal nejlepší vlastnosti a nástroj z toho materiálu vyvrtal celých pět děr. Samozřejmě může a troufám si tvrdit, že s vysokou pravděpodobností i má na absolutní trvanlivost nástrojů vliv oblast v blízkosti povrchu předvrtané díry, která je již zpevněna předchozím obráběním a vytváří tak v této oblasti velký gradient napětí. Břit je tudíž v místě styku s touto oblastí velmi zatěžován a může zde být iniciován vznik vrubu. Proto je potencionální vrub v tomto místě vyřazen z hodnocení opotřebení a do výsledků nezasahuje.

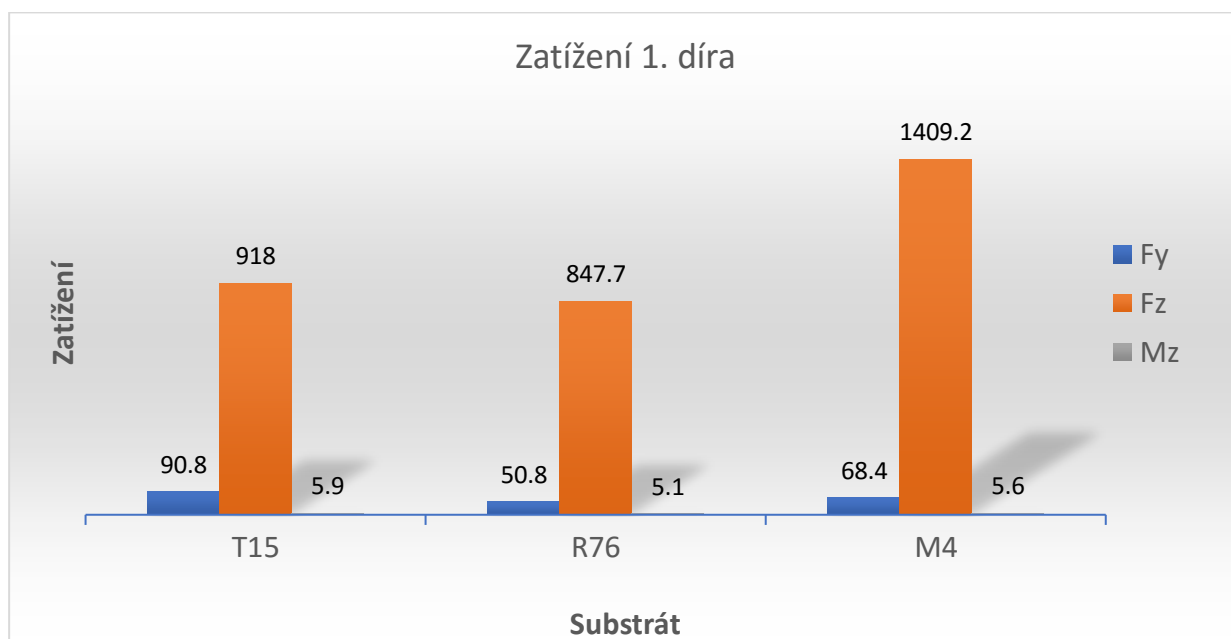


Obr. 26 - Břit nástroje z M4 po 1. díře (2-A)

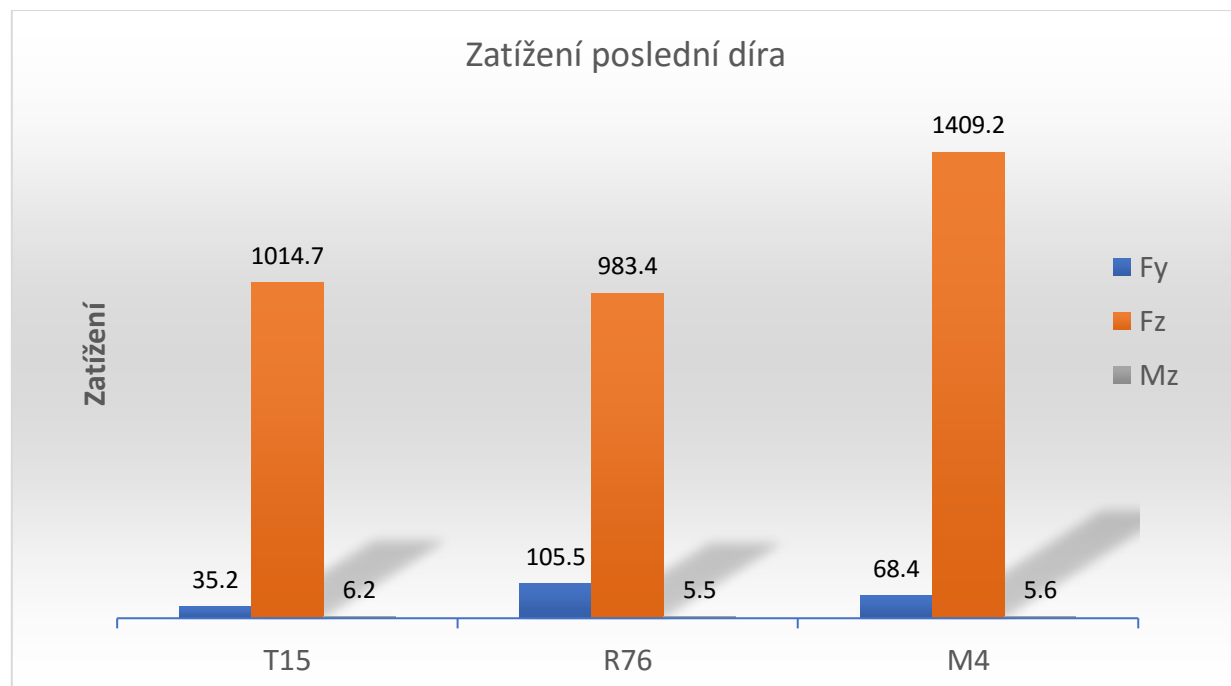


Graf 11 – Celkové opotřebení hřbetu (experiment 2-A)

Velkou neznámou je silové zatížení vrtáků, při již optimalizovaném experimentu. Zejména následné srovnání s výsledky zatížení při vrtání s nástroji opatřenými tenkou vrstvou bude důležité, jelikož v prvním experimentu je diskontinuita hodnot silového zatížení považována za indikaci nevhodných podmínek experimentu. Následující graf č. 12 obsahuje hodnoty zatížení při vrtání první díry každého z nástrojů. Graf č. 13 s hodnotami zatížení při výrobě poslední díry je níže.



Graf 12 - Silové zatížení při vrtání 1.díry (2-A)

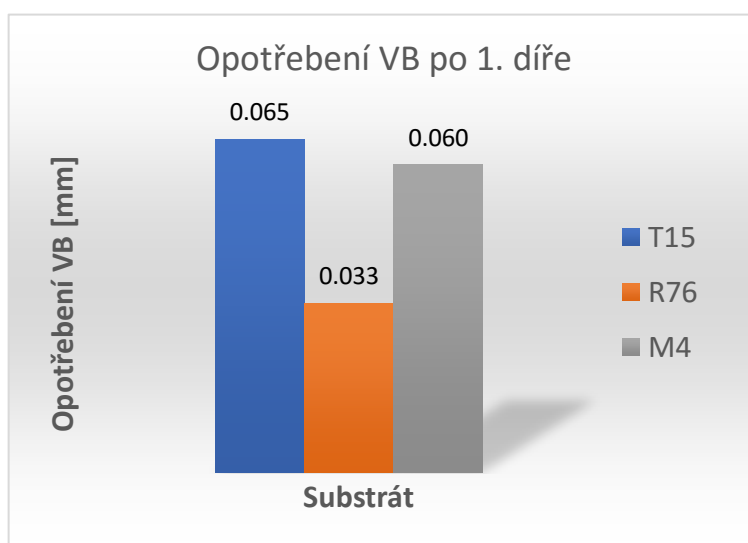


Graf 13 - Silové zatížení při vrtání poslední díry (2-A)

Hodnoty silového zatížení nástroje z *M4* jsou v obou grafech přirozeně identické, jelikož byl tento nástroj prohlášen za nevyhovující hned po vyvrtání první díry, a tak jsou dostupné pouze tyto jediné hodnoty. Nástroj z *T15* byl také prohlášen za nevyhovující, avšak byla vyvrtána i druhá díra z důvodu nalepené třísky na břitu. Při vrtání druhé díry se nástroj „zařízl“ a třísky z břitu se zbavil. To je také zřetelně vidět na změně poměru mezi zatěžujícími silami v osách Y a Z. Hodnoty u substrátu *R76* pak korelují s mírou opotřebení břitu a v tuto chvíli je lze akceptovat jako relevantní (předpokládaná redukce sil v ose Y i Z vůči prvnímu testu 1-A).

4.4 Experiment (2-B)

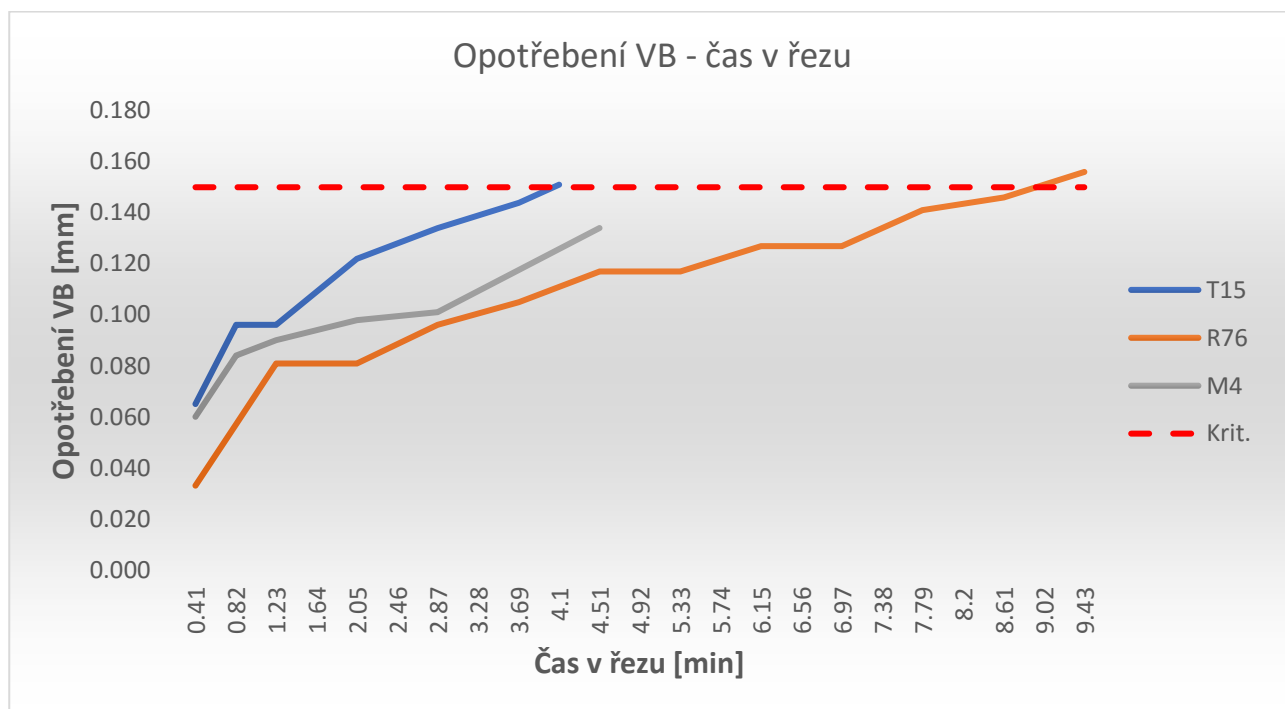
Jedná se o druhý experiment (B), tedy vrtání s předvrtanou dírou (nástroje opatřené tenkou vrstvou). Čtvrtý a také poslední test s účelem určit vliv substrátu na trvanlivost šroubových vrtáků při vrtání Inconelu 718. Graf č. 14 opět informuje o opotřebení vrtáků po první díře a jsou v něm opět hodnoty všech tří nástrojů, což znamená, že všechny nástroje vyvrtaly více než jednu díru. Nástroje z materiálů *T15* a *M4* mají srovnatelné hodnoty s hodnotami v testu 1-B, vrták z *R76* je ovšem opotřeben téměř o polovinu méně. VB 0,033 mm je zároveň celkově nejnižší dosaženou hodnotou opotřebení po vyvrtané první díře ve všech testech. Při pohledu na graf č. 15 na další straně je více než zřejmá dominance nástroje vybroušeného z práškové nástrojové rychlořezné oceli *R76* s téměř dosaženými deseti minutami celkové trvanlivosti. Oba další testované nástroje vydržely pod kritériální hranicí opotřebení 0,150 mm „pouze“ kolem čtyř minut. Křivka opotřebení všech nástrojů je lehce degresivního charakteru. Přínos deponované tenké vrstvy je logicky možno hodnotit pouze u nástrojů, které splnily podmínky obou experimentů. Ovlivnění trvanlivosti nástrojů depozicí tenké vrstvy je v Tab. 11.



Graf 14 - Opotřebení po první díře (2-B)

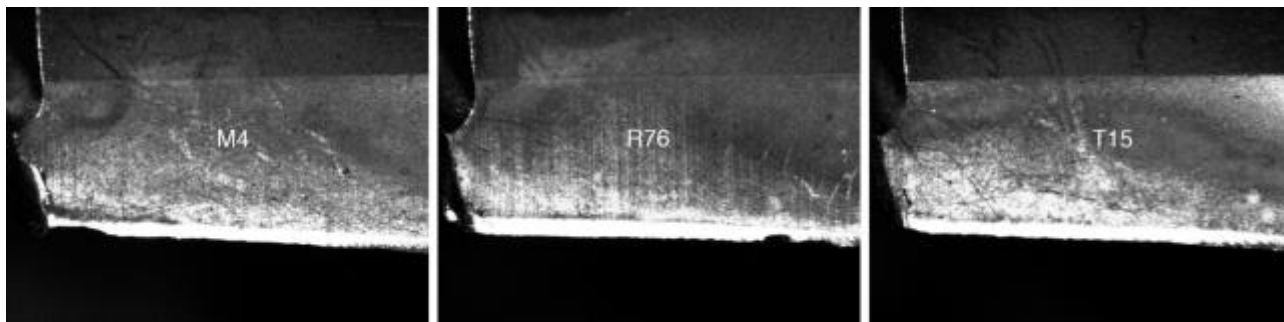
Substrát	Trvanlivost bez vrstvy [min]	Trvanlivost s vrstvou [min]	Rozdíl [%]
T15	-	4,10	-
M4	-	4,51	-
R76	2,05	9,02	+440,00

Tab. 11 - Přínos tenké vrstvy (2-A; 2-B)



Graf 15 - Celkové opotřebení hřbetu (experiment 2-B)

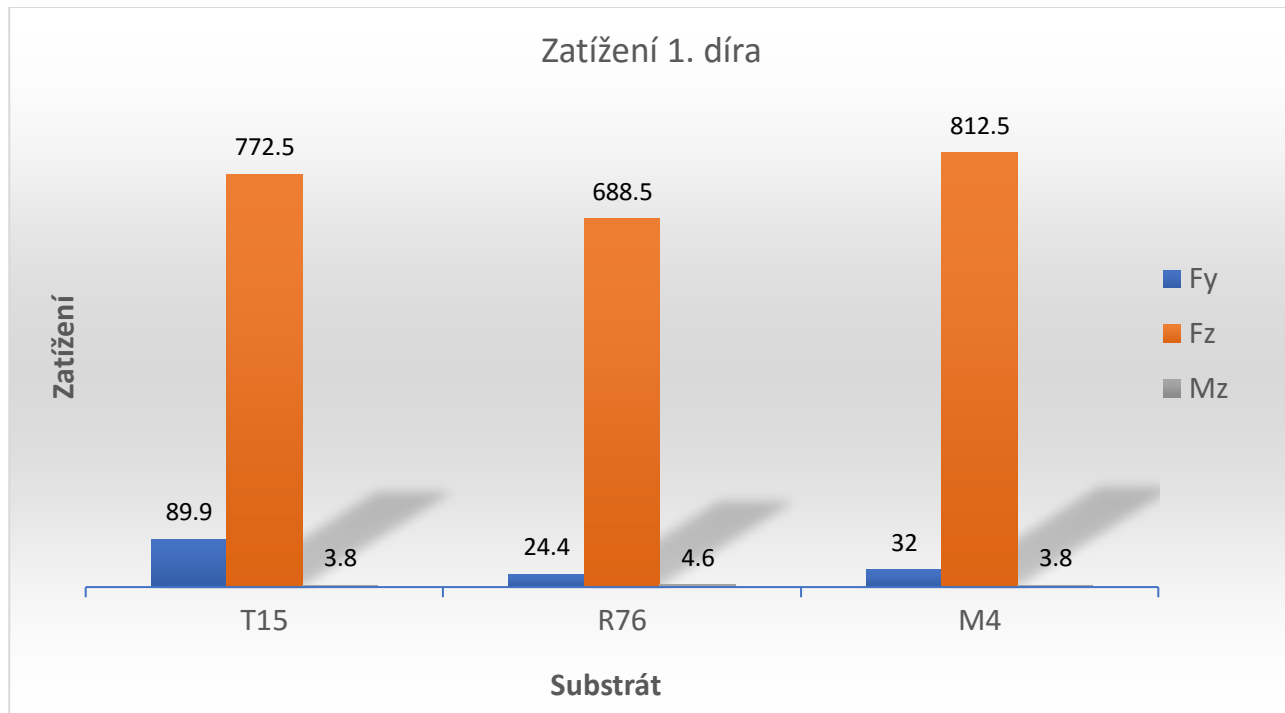
Snímky stavu břitů po překročení meze opotřebení mohou přispět k celkovému obrazu o chování jednotlivých materiálů v procesu obrábění a rozšířit tak úhel pohledu na celou problematiku. V případě materiálu *M4* došlo k odlomení substrátu na okraji břitu, a to je důvodem pro předčasné ukončení jeho trvanlivosti i bez dosažení meze opotřebení. V průběhu testu se opět na břit nalepoval obráběný materiál. *R76* má lineární opotřebení po celé délce břitu až na jeho pravou část. K vylomení substrátu na pravé straně v blízkosti hranice předvrtané díry došlo při vrtání poslední díry a jak bylo zmíněno dříve, tato oblast je z hodnocení vyloučena. Substrát *T15* dosáhl limitní hranice standardní cestou a opotřebení je v podstatě lineární. Problematický je ale veliký úbytek materiálu břitu, který pravděpodobně zapříčinil nízkou trvanlivost tohoto vrtáku.



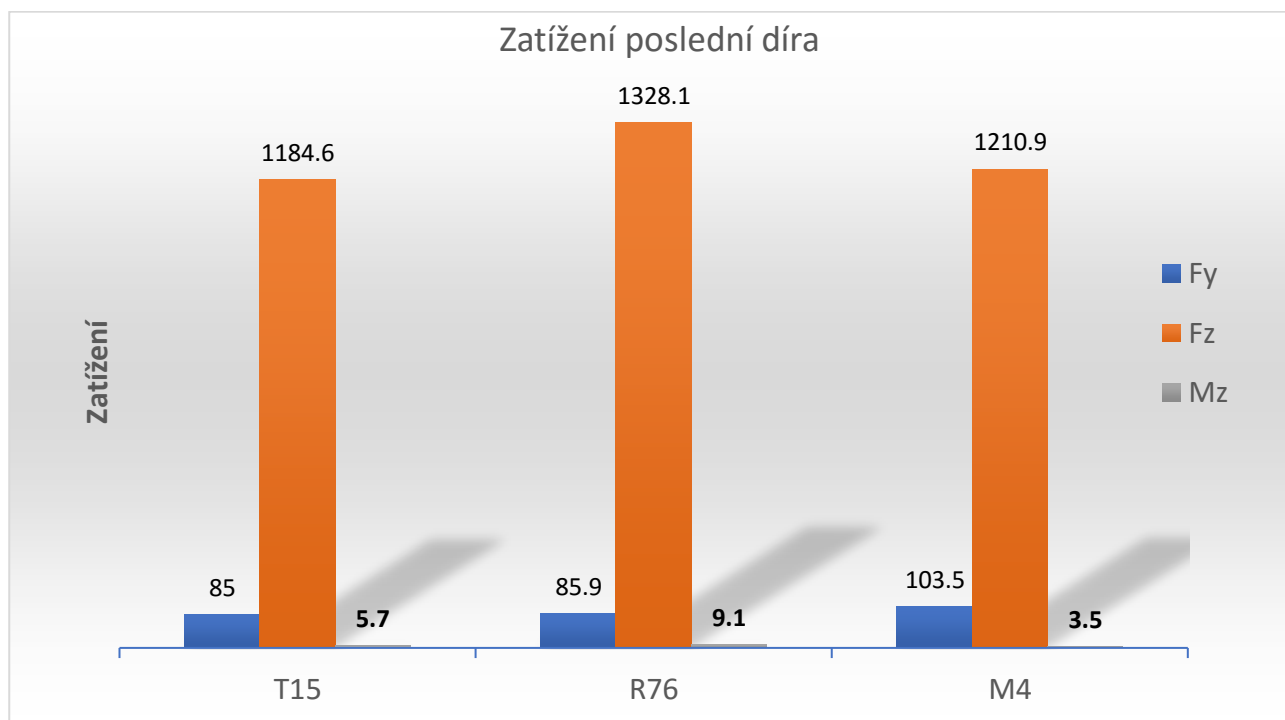
Obr. 27 – Stav břitů po dosažení mezního opotřebení (2-B)

Informace o silovém zatížení nástrojů při tomto experimentu jsou uvedeny v grafech č. 16 a č. 17 na další straně. Na první pohled jsou hodnoty řádově srovnatelné s experimentem prováděným s nástroji bez depozice. Zatížení nástrojů při první díře je ve všech složkách nižší než u nástrojů bez tenké vrstvy a tento fakt se shoduje s předpokladem pozitivního ovlivnění bilance sil nánosem tenké vrstvy.

U všech nástrojů je znatelný výraznější nárůst sil i krouticího momentu mezi vrtáním prvních a posledních děr, nežli tomu bylo při vrtání vrtáky bez depozice.



Graf 16 - Silové zatížení při vrtání 1. díry (experiment 2-B)



Graf 17 - Silové zatížení při vrtání poslední díry (experiment 2-B)

Shrnutí druhého experimentu

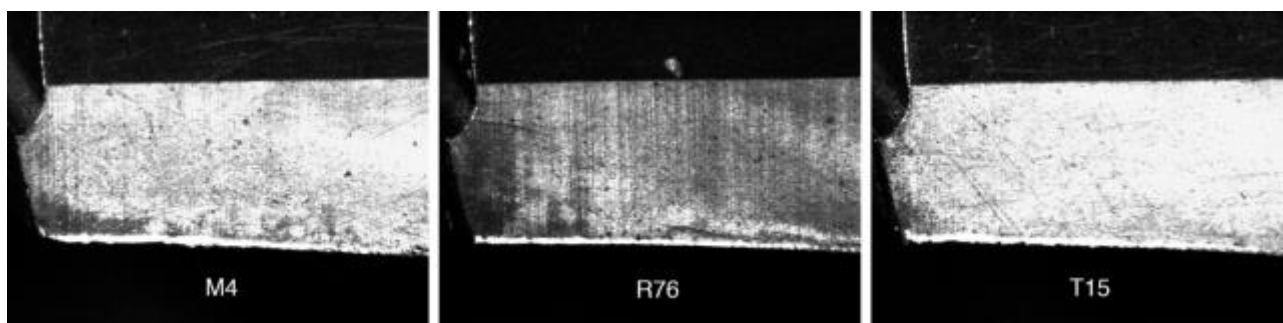
V druhém experimentu jsou vyhodnoceny následující hodnoty:

- Opotřebení hřbetu po první díře.
- Celková trvanlivost nástroje.
- Vizuální stav břitů.
- Silové zatížení při první díře.
- Silové zatížení při poslední díře.

Jedná se zjevně o totožné vyhodnocení jako u prvního experimentu a význam jednotlivých vyhodnocení byl popsán již v kapitole „Shrnutí prvního experimentu“, kde je zmíněno také odůvodnění návrhu druhého experimentu. Druhý experiment má za úkol eliminovat vliv geometrie příčného ostří předvrtáním děr o průměru větším, než je právě tato problematická oblast a dle dosažených výsledků můžeme považovat tento úkol za splněný. K částečným vyštípnutím substrátu docházelo stále (zejména u nástrojů bez tenké vrstvy), ale vždy alespoň jeden nástroj dosáhl mezního opotřebení standardní cestou. Výsledky měření řezných sil navíc potvrzují teorii, že problém byl právě v oblasti příčného ostří. Po eliminaci jeho vlivu jsou řezné síly u nástrojů bez i s tenkou vrstvou řádově ve stejné hladině a je tak možné říci, že experiment splnil svůj účel.

Zajímavostí druhého experimentu bylo prohloubení rozdílů mezi substráty v hodnotách opotřebení při první díře a také poměrově vyšší nárůst sil mezi první a poslední dírou u nástrojů s depozicí, nežli tomu bylo u nástrojů bez depozice.

U druhého experimentu (B) je zajímavý nejen pohled na stav břitů po poslední, ale také po první vyrobené díře. Rozdíl mezi stavem substrátů po první díře již jednoznačně poukazuje na rozdíly mezi nimi. Opotřebení materiálů *M4* a *T15* je zjevně méně pravidelné, než je tomu u substrátu *R76*, který ve všech testech jednoznačně dominoval. Je nutné si uvědomit, že se jedná o snímky břitů opatřených vrstvou čili substrát by měl být alespoň u první díry dostatečně chráněn. Jak je vidět na Obr. 28, rozdíly jsou přesto poměrně signifikantní. Širší souvislosti a další informace k výsledkům jsou shrnuty v následující kapitole – „Rozbor výsledků“.



Obr. 28 - Stav břitů po první díře (experiment 2-B)

4.5 Rozbor výsledků

Celkový rozbor výsledků je velmi důležitou částí celé práce. Je totiž možné provést množství různých experimentů za pomoci nejnovější a často velmi drahé techniky, ale nedostatečná, nebo dokonce nesprávná interpretace výsledků dokáže vložené úsilí absolutně znehodnotit. Konkrétní a přesné výsledky jednotlivých faktorů testu také samy o sobě nutně nemusí znamenat maximum informací o dané problematice, a proto je nutné pohlížet na zkoumanou problematiku komplexně a s nadhledem.

Jasným důkazem jsou výsledky experimentu 1-A, kde při vyhodnocení prvního faktoru (opotřebenění hřbetu po 1. díře) vyšel nejlépe substrát *R76*, ale při vyhodnocení druhého faktoru celkové trvanlivosti byl jasně nejlepším substrátem *T15*. Při pohledu na stav břitů po dosažení mezní hodnoty opotřebenění byl na tom pak nejlépe opět substrát *T15* (nástroj z *R76* měl odštipnuté příčné ostří). Při ignorování dílčích konsekvencí s dalšími testy a výslednými hodnotami by bylo možné říci, že čistě z pohledu trvanlivosti nástroje je jednoznačně nejlepší nástroj z materiálu *T15*. Teď už víme, že by to byla fatální chyba.

Při vrtání velmi tvrdých superslitin je takřka nemožné dosáhnout ucházejících trvanlivostí nástroje bez využití depozice tenkých vrstev. Proto byly nástroje podrobeny identickému testu s jejich použitím. Výsledky byly tentokrát téměř diametrálně odlišné. Při vyhodnocení prvního faktoru (opotřebenění hřbetu po 1. díře) sice opět nejnižší hodnota patřila nástroji ze substrátu *R76* stejně jako v testu předchozím, ale všechny další hodnoty byly v přímém rozporu. Celkovou trvanlivost měl vrták z *T15* absolutně nejhorší a stav jeho břitů jevil známky úbytku materiálu. Výsledky druhé verze prvního experimentu ukázaly, že tenká vrstva má na nástroje skutečně značný vliv. Záměrně dosud nebyl zmíněn faktor silového zatížení, jelikož je ve vyhodnocení prvního experimentu spolu s destrukcí geometrie příčného ostří klíčový. Jak bylo již několikrát zmíněno, při prvním testu (A) docházelo v oblasti příčného ostří k závažným poruchám geometrie, a to bylo důvodem pro předčasné ukončení trvanlivosti všech nástrojů ještě před dosažením kritériální hodnoty lineárního opotřebenění. Při druhém testu (B) geometrie nástrojů vydržela a všechny tři nástroje dosáhly mezní hodnoty opotřebenění bez jakéhokoli přerušení testu. V prvním případě bylo tedy zcela nemožné relevantně posoudit skutečnou trvanlivost vrtáků. Příčina je evidentní a potvrzuje to i pohled na silové zatížení nástrojů v řezu. Použitím tenkých vrstev byly vrtáky zpevněny a dokázaly udržet tvar ostří po celou dobu testu. Radikálně se ale změnil poměr naměřených sil, a to je jasným důkazem o tom, že výsledky experimentu 1-A byly ovlivněny změnou geometrie. Vliv geometrie na dosažené výsledky je z hlediska cíle diplomové práce samozřejmě nepřijatelný, a proto byl test optimalizován. Průměrné hodnoty zatížení nástrojů bez vrstvy a s vrstvou v prvním experimentu jsou v Tab. 12.

Složka zatížení	Bez vrstvy	S vrstvou
F_Y	595,71 N	132,25 N
F_Z	1600,08 N	4188,69 N
M_Z	7,43 Nm	7,16 Nm

Tab. 12 - Silové zatížení (experiment 1)

Dosahované trvanlivosti v druhém experimentu (A) byly znovu nízké a ve dvou případech (*T15* a *M4*) byly trvanlivosti nástrojů opět předčasně ukončeny. Tento fakt je ovšem s přihlédnutím k průměrnému zatížení nástrojů ve druhém experimentu možno považovat za projev vlastností substrátů. Zatížení v druhém experimentu je totiž řádově ve stejné hladině jako při testech 1-A, 2-A a 2-B. Rozdíl mezi experimenty 1 a 2 obecně je samozřejmě zapříčiněn odlehčením středu vrtáku při druhém experimentu. Nástroj ze substrátu *R76* dosáhl v testu 2-A meze opotřebení bez přerušení a tak jako jediný ze tří testovaných splnil podmínky a zachoval svoji tvarovou integritu. Průměrné hodnoty zatížení nástrojů bez vrstvy a s vrstvou v druhém experimentu jsou v Tab. 13. Konzistentnost zatížení v obou částech druhého experimentu ukazuje, že optimalizace byla efektivní a přispěla k celkové věrohodnosti výsledků jako takových. Výsledky z druhého experimentu tím pádem lze, dle mého názoru, považovat za směrodatné a správné.

Složka zatížení	Bez vrstvy	S vrstvou
F_Y	69,85 N	70,17 N
F_Z	1097,03 N	999,52 N
M_Z	5,65 Nm	5,08 Nm

Tab. 13 - Silové zatížení (experiment 2)

Pro úplnost vyhodnocení je také nutné vypočítat měrný řezný odpor u jednotlivých substrátů K_C . Dostaneme tak ucelené relevantní informace o výsledcích každého materiálu. Při výpočtu měrného řezného odporu vycházíme ze vztahu:

$$K_C = \frac{F_C}{A} [MPa]$$

kde: $K_C [MPa]$ je měrný řezný odpor

$F_C [N]$ je řezná síla

$A [mm]$ je jmenovitý průřez třísky

Přičemž je nutné získat hodnotu řezné síly F_C a jmenovitého průřezu třísky A . Složka řezné síly vychází z kroutícího momentu M_Z a je třeba si uvědomit, že kroutící moment je nutné dosadit v jednotkách $[N/mm]$:

$$M_Z = 2 \cdot \frac{F_C}{2} \cdot \frac{D}{4} = \frac{1}{4} \cdot F_C \cdot D \rightarrow F_C = \frac{4 \cdot M_Z}{D} [N]$$

kde: $M_Z [N/mm]$ je kroutící moment

$D [mm]$ je průměr vrtáku

$F_C [N]$ je řezná síla

Průřez třísky A odebírané jedním břitem nástroje dostaneme z následujícího vztahu:

$$A = b \cdot h = a_p \cdot \frac{f}{2}$$

kde: $A[\text{mm}^2]$ je jmenovitý průřez třísky

$b[\text{mm}]$ je jmenovitá šířka třísky

$h[\text{mm}]$ je jmenovitá tloušťka třísky

$a_p[\text{mm}]$ je šířka záběru ostří

$f[\text{mm}]$ je posuv na otáčku

Při vrtání do plného materiálu je šířka záběru ostří $a_p = D/2$, při výrobě díry s předvrtáním je pak $a_p = (D - d)/2$. Předchozí rovnice průřezu třísky byla uvedena pro úběr jedním břitem, a proto v případě vrtání musíme rovnici vynásobit dvěma, jelikož nástroj pro vrtání má v našem případě břity dva. Po vynásobení dostaneme tyto dílčí vztahy:

$$A_{doplna} = \frac{D \cdot f}{2}$$

$$A_{předvrtání} = \frac{(D - d) \cdot f}{2}$$

kde: $A_{doplna} [\text{mm}^2]$ je jmenovitý průřez třísky při vrtání do plna

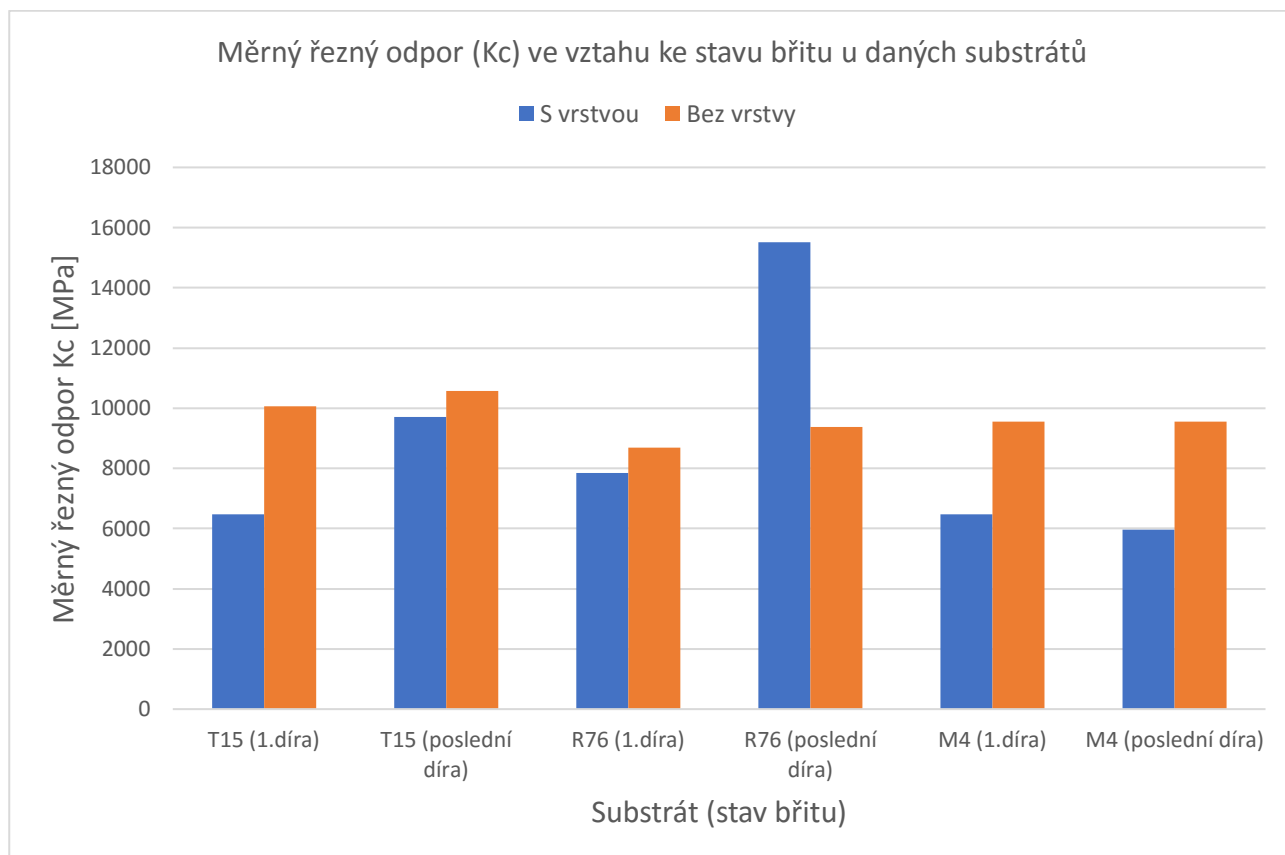
$A_{předvrtání} [\text{mm}^2]$ je jmenovitý průřez třísky při vrtání s předvrtáním

$D[\text{mm}]$ je průměr vrtáku

$d[\text{mm}]$ je průměr předvrtané díry

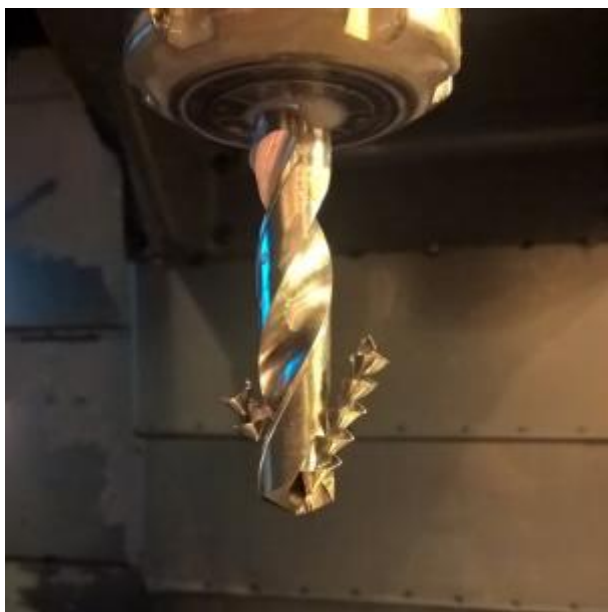
$f[\text{mm}]$ je posuv na otáčku

V Grafu č. 18 jsou vidět výsledné měrné řezné odpory všech testovaných nástrojů. Výsledky jsou uvedeny pouze pro vrtání s předvrtanou dírou, jelikož dle předchozích odůvodnění první experiment nemůžeme brát jako zcela relevantní v rámci požadavků na něj kladených. Obecnou tendencí je samozřejmě zvyšování řezného odporu směrem ke konci životnosti nástroje. Lze také říci, že nástroje opatřené tenkou vrstvou vykazují všeobecně nižší hodnoty K_C . Za povšimnutí ale stojí výrazné zvýšení měrného řezného odporu vypočítaného u substrátu *R76* (bez vrstvy, poslední díra) vůči odporu u první díry. Příčinou může být náhlá změna tvaru břitu v důsledku případného defektu.



Graf 18 - Graf s výsledky měrného řezného odporu

Další hypotézou založenou na objektivním pozorování je přenositelnost vlastností substrátů na celkové vlastnosti nástroje v řezném procesu i přestože je použita ochranná tenká vrstva. Důvodem pro vznik této hypotézy bylo chování nástrojů ze substrátu *M4* v řezném procesu. Jak dokazuje Obr. 30, při vrtání docházelo k soustavnému nalepování třísky obráběného materiálu na vrtáky vybroušené z tohoto substrátu. Důležitou informací je, že tuto vlastnost vykazoval jen a pouze nástroj z materiálu *M4* a že se tato vlastnost projevovala i při vrtání nástrojem s aplikovanou tenkou vrstvou. Ačkoli by jej tato vrstva měla chránit svou tvrdostí i svými kluznými vlastnostmi, po určité době došlo k naprosto stejnému jevu (viz. Obr. 29).

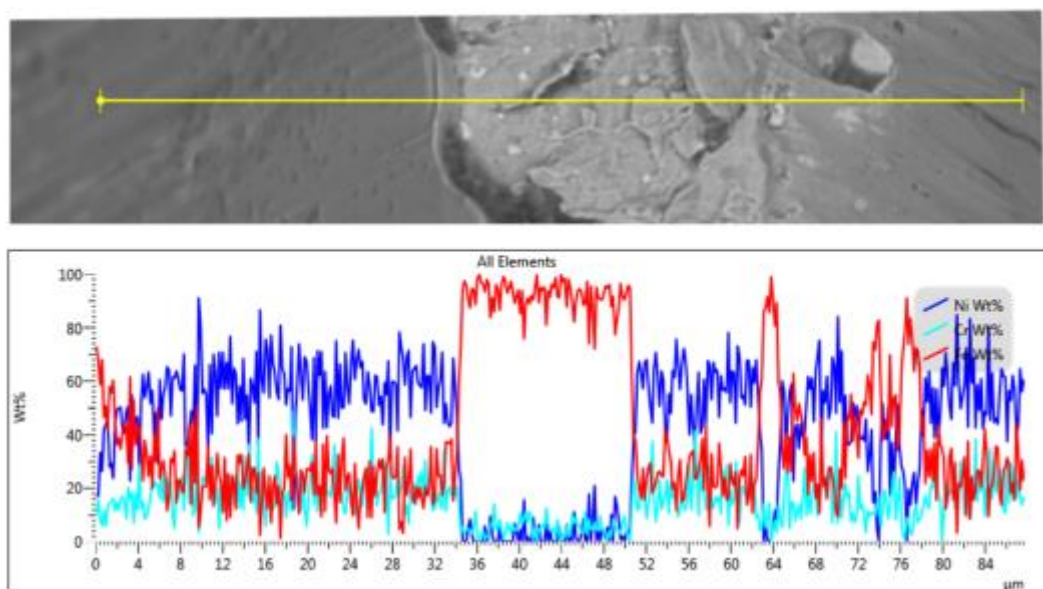


Obr. 30 - Nalepená tříška na nástroji z materiálu M4 bez tenké vrstvy (2-A)



Obr. 29 - Nalepená tříška na nástroji z materiálu M4 s tenkou vrstvou (2-B)

Na základě výše uvedených zjištění byla zadána pro vypracování EDS¹⁶ analýza, která dokáže určit chemické složení zkoumaného povrchu v souvztažnosti k poloze analyzovaného materiálu. Výsledky této analýzy jsou vidět na Obr. 31. V horní části obrázku je vidět 3000x zvětšený břit použitého nástroje a žlutá přímka na něm naznačuje oblast prováděné analýzy. Pomyslné body žluté přímky korelují s hodnotami v grafu kolmo pod ní. Červenou barvou je vyznačen procentuální obsah železa, světle modrou procentuální obsah chromu a tmavě modrý je procentuální obsah niklu na zkoumaném povrchu.



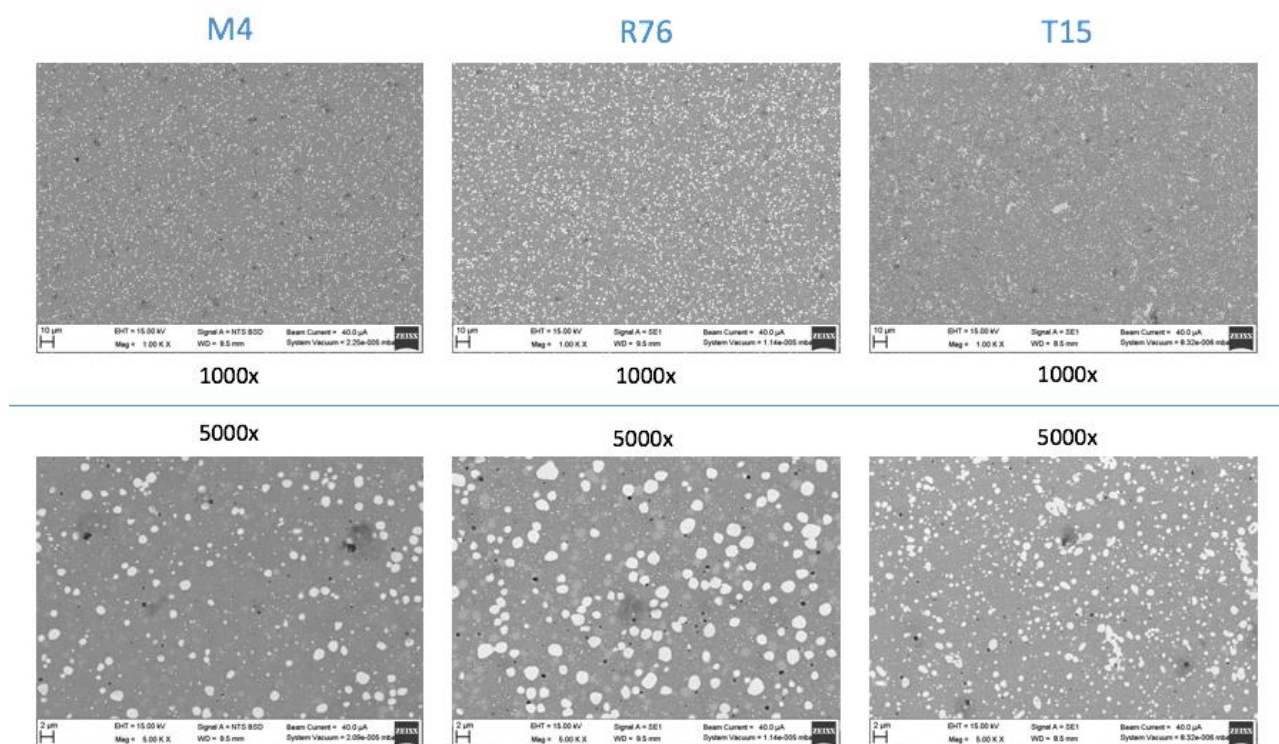
Obr. 31 - EDS analýza vrtáku

¹⁶ Zkratka pro technologii Energy-Disperse Spectroscopy (Energiově-dispersní spektrometrie)

Jak je vidět ve středu grafu, výsledky analýzy ukazují, že při vrtání nástrojem s depozicí dojde během krátkého času k odhalení substrátu a břit nástroje není chráněn žádnou vrstvou. To vysvětluje a zároveň dokazuje přenositelnost vlastností substrátu na nástroj jako takový i při jeho deponování tenkou vrstvou. Vliv substrátu na trvanlivost a chování nástroje je již více než zřejmý a považují to za splnění cíle, který si kladla tato diplomová práce. Analýza mimo jiné ukázala také tendenci ulpívání niklu na povrchu nástroje, což příkládám zejména vysokým tlakům vznikajícím při tomto druhu obrábění.

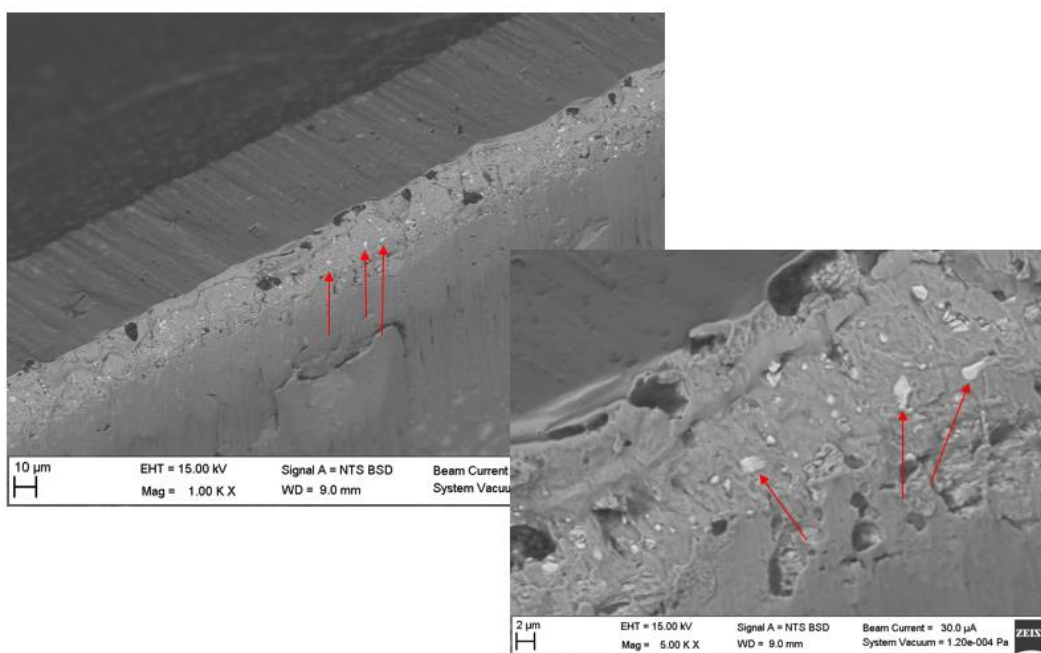
Posledním důležitým hlediskem pro rozbor výsledků experimentu je tedy rozbor z hlediska materiálu. Ze zadaných zkoušek použitých vrtáků lze vyvodit obecné poznatky a doporučení pro budoucí použití substrátů v oblasti vrtání Inconelu 718.

Prvním základním rozbohem z hlediska materiálu je srovnání mikrostruktury použitých substrátů. U nástrojových ocelí je kromě chemického složení důležité také rozložení a velikosti karbidů. U vzorku R76 je největší hustota částic různých velikostí a velmi rozdílných chemických složení. Ani největší částice na bázi karbidů wolframu nemají tendenci se nerovnoměrně shlukovat nebo lokálně hrubnout. Oproti tomu u vzorku T15 tvoří karbidy wolframu často shluky nebo větší komplexnější útvary (velké světlé fleky). Tyto větší útvary jsou křehké a můžou mít tendenci praskat nebo oddělovat se od tvárnější matrice (vypadávat) a v obou případech tak mohou iniciovat vznik trhlin. U vzorku M4 je hustota karbidů menší, než u R76 a karbidy jsou celkově drobnější. Tomu odpovídají i celkové tvrdosti materiálů, vzorek M4 vykazoval menší tvrdost cca 236 HV0.5, než vzorky R76 a T15, jejichž tvrdosti byly srovnatelné a dosahovaly cca 283 HV0.5.

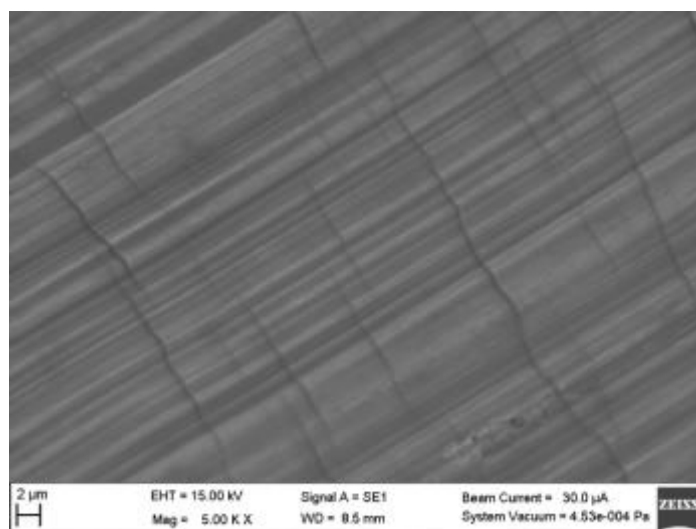


Obr. 32 - Mikrostruktura použitých substrátů

Na základě získaných výsledků se zdá, že obecně lépe vycházejí substráty, které mají dostatečnou hustotu rovnoměrně rozmístěných karbidů různých velikostí, a které se zároveň neshlukují a nevytváří hrubší útvary. Přítomnost vyššího počtu rovnoměrně rozložených karbidů dle výsledků zřejmě přispívá k celkové trvanlivosti a stabilitě nástroje s odhaleným břitem. Zvyšuje také jeho řezivost a jak je vidět na Obr. 33, karbidy v podobě světlých skvrn jsou očividně v přímém kontaktu s obráběným materiálem a je to právě jejich tvrdost, která tvoří břit vrtáku odolným a relativně efektivním. Na dalším obrázku (Obr. 34) je 5000x zvětšený snímek třísky vzniklé při experimentu. Tříska má na sobě zřetelné drážky ve stejném směru, kterým odcházela z čela nástroje, a proto se domnívám, že drážky jsou způsobeny právě těmito odhalenými karbidy. Je nutné podotknout, že tato má domněnka není nijak ověřena.

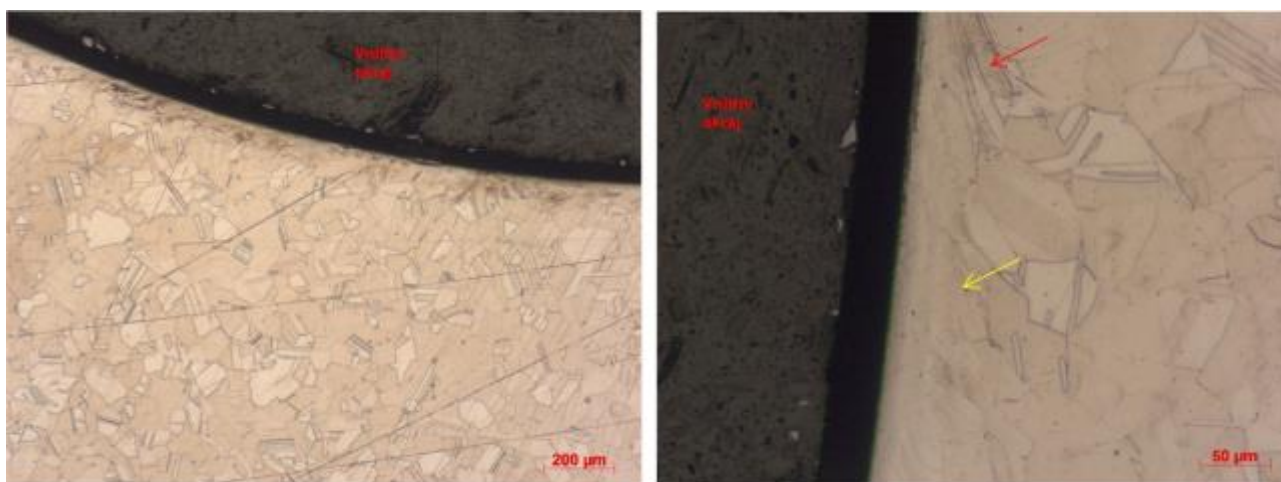


Obr. 33 - Odhalené karbidy na břitu



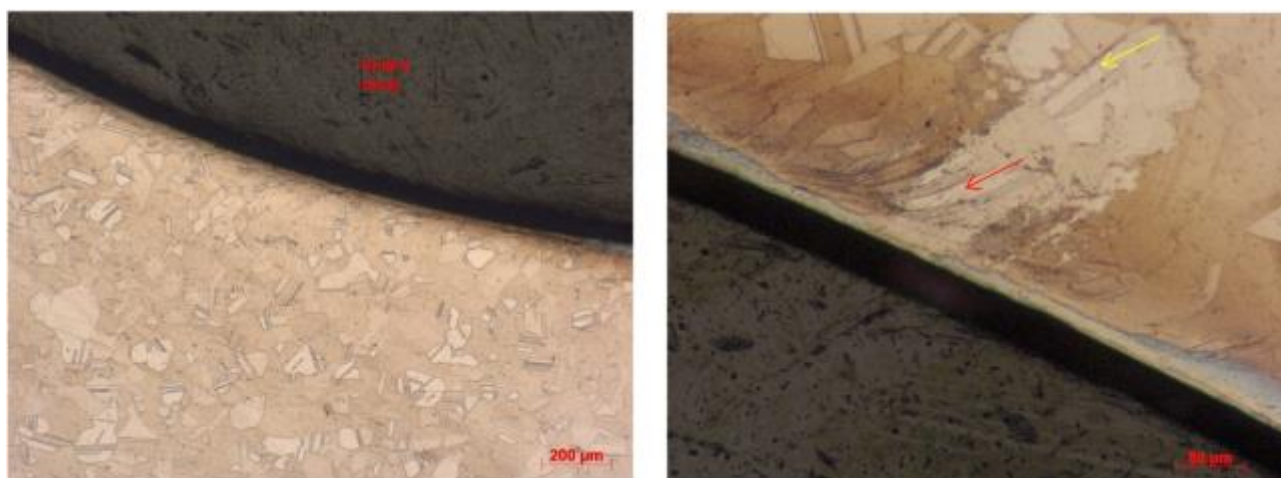
Obr. 34 - Povrch třísky vzniklé vrtáním

Dalším rozbořem z hlediska materiálu je rozbor stavu materiálu obrobku. Na všech následujících snímcích je patrná plastická deformace oblastí u obvodu díry. Tato deformace postihuje jednu až dvě řady zrn na povrchu díry. Hloubka ovlivněné oblasti kolísá podle velikosti zasažených zrn. U vzorků docházelo rovněž k deformaci dvojčatových pásů v této oblasti. Po obvodu díry jsou dále vidět stopy skluzných pásů uvnitř zrn i dvojčat svědčící o lokálním překročení kritického smykového napětí. Na Obr. 35 vlevo je vidět stav materiálu obrobku po vyvrtání díry nástrojem z T15 (přiblížení 50x). Na obrázku vpravo jsou pak vidět deformované dvojčatové pásy s viditelnou sadou skluzných čar (červená šipka) a skluzné čáry uvnitř zrn (žlutá šipka). Zvětšení snímku vpravo je 200x.



Obr. 35 - Struktura obrobeného materiálu (vrtáno nástrojem z T15)

Vpravo na Obr. 36 je srovnání deformovaných dvojčat (červená šipka) a nedeformovaného dvojčatového pásu podobných rozměrů (žlutá šipka). V tomto případě se jedná o stav materiálu obrobku po vrtání nástrojem z R76. Zvětšení snímku vlevo je 50x a snímku vpravo 200x.



Obr. 36 - Struktura obrobeného materiálu (vrtáno nástrojem z R76)

5 Závěr

Diplomová práce přispívá k objasnění problematiky mechanismu opotřebení břitů šroubovitých vrtáků z práškové rychlořezné nástrojové oceli při vrtání děr do hloubky $1D$ s průměrem $D = 10 \text{ mm}$ do specifické niklové slitiny *Inconel 718*, která je za běžných podmínek velice obtížně obrobitelná. Práce prokazuje vysokou míru vlivu substrátu na celkové chování nástroje v podobě interakce nástrojového materiálu s obráběným materiálem, a především v podobě míry opotřebení. Experimenty ukazují, že substrát *R76* je pro tuto konkrétní aplikaci ze všech tří testovaných materiálů jednoznačně nejvhodnější. Prášková nástrojová rychlořezná ocel *R76* má oproti ostatním materiálům vynikající otěruvzdornost, vykazuje nejlineárnější průběh opotřebení hřbetu a také má velmi dobrou kohezi s tenkou vrstvou. V druhém testu měl nástroj z *R76* dokonce dvakrát delší trvanlivost než zbylé dva substráty *T15* a *M4*. Nástrojový materiál *R76* je schopen obrábět již zmíněnou superslitinu s trvanlivostí v řádech několika minut a lze ho tedy doporučit pro další výzkumnou činnost v problematice vrtání děr do *Inconelu 718*.

Překvapivé je zjištění přenositelnosti vlastností substrátu na nástroj s deponovanou tenkou vrstvou. Příčinou tohoto jevu je velké zatížení břitu nástroje, při kterém dojde po krátké době k jeho odhalení a povrch v bezprostřední blízkosti ostří poté tvoří samotný substrát, nikoli ochranná tvrdá vrstva. Nástroj jako celek, se pak vůči obráběnému materiálu chová stejně, jako se k němu chová nástroj bez vrstvy. To lze chápat tak, že pokud má například vrták bez vrstvy tendenci k nalepování třísky na břit, nástroj s vrstvou tuto vlastnost po určité době v řezu začne vykazovat taktéž. Stejně je to například s tvorbou nárůstků apod. Navzdory tomuto negativnímu jevu je doba životnosti nástroje s vrstvou i tak o něco vyšší než bez ní. Přínos tenké vrstvy *TripleCoating Cr* je značný (lze hovořit o navýšení trvanlivosti vrtáků až o 500 % oproti vrtákům bez této ochrany).

Obecně lze moderní PM-HSS oceli spolu s vrstvami nejnovější generace označit za konkurenceschopnou alternativu k nástrojům ze slinutých karbidů. Práškové nástrojové oceli přirozeně využívají svůj potenciál vysoké houževnatosti zejména při lokálních defektech geometrie, na což je slinutý karbid velice náchylný. Nespornou výhodou je také práce s geometrií a mikrogeometrií nástroje, jelikož v tuto chvíli je geometrie pravděpodobně nejdůležitější částí vývoje vrtáků pro úspěšné obrábění *Inconelu 718*.

Z provedených testů vyplývá, že oblast u osy vrtáku, kde se řezná rychlost blíží nule dochází k výrazným defektům nástroje, které se dále šíří a výrazně snižují jeho celkovou trvanlivost. Geometrie v této oblasti, tedy geometrie příčného ostří musí zajistit co nejmenší plastickou deformaci „tvářením“ obráběného materiálu, stabilní plynulé odřezávání a odvod třísky. K tomuto ideálnímu stavu je možné se přiblížit několika způsoby. Jedním z nich jistě může být precizní a inovativní geometrie nebo například lokální zpevnění oblasti špičky dodatečným tepelným zpracováním.

Tlak na výzkum a vývoj v letectví a energetice je citelný a předpovídá další progresivní vývoj technologií. Vzhledem k časté aplikaci vrtání *Inconelu 718* v leteckém průmyslu je každý nový poznatek v této problematice velmi přínosný a může ušetřit nemalé náklady. Budoucnost obrábění tvrdých superslitin na bázi niklu lze očekávat v mnoha různých směrech. Můžou to být zcela nové vrstvy, které dokáží udržet břit déle ochráněný, nové a revoluční pojetí geometrie, nebo nekonvenční metody obrábění.

6 Citovaná literatura

- [1] Astakhov, Viktor P. *Geometry of single-point Turning Tools and Drills*. Michigan State University : Springer, 2010. ISBN: 978-1-84996-052-6.
- [2] ESPI Metals. *www.espimetal.com*. [Online] [Citace: 28. prosinec 2016.] <http://www.espimetal.com/index.php/technical-data/167-Nickel%20and%20Nickel%20Alloys-%20Machining>.
- [3] Aircraft Materials. *www.aircraftmaterials.com*. [Online] [Citace: 27. prosinec 2016.] <http://www.aircraftmaterials.com/data/nickel/718.html> – Inconel 718.
- [4] Wikipedia. *www.wikipedia.org*. [Online] [Citace: 27. Prosinec 2016.] <https://en.wikipedia.org/wiki/Inconel>.
- [5] High Temp Metals. *www.hightempmetals.com*. [Online] [Citace: 27. prosinec 2016.] <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718data.php>.
- [6] Total Materia. *www.totalmateria.com*. [Online] [Citace: 28. prosinec 2016.] <http://www.totalmateria.com/Article32.htm>.
- [7] *PHYSICAL METALLURGY OF ALLOYS 718, 725, 725HS, 925 FOR SERVICE IN AGGRESSIVE CORROSIVE ENVIRONMENTS*. [Online] [Citace: 29. prosinec 2016.] http://www.pccforgedproducts.com/web/user_content/files/wyman/Physical%20Metallurgy%20of%20Alloys%20718,%20725,%20725HS,%20925%20for%20Service%20in%20Aggressive%20Corrosive%20Environments.pdf.
- [8] MATERIALS AND GEOENVIRONMENT. *RMZ*. [Online] [Citace: 29. prosinec 2016.] http://www.rmz-mg.com/letniki/rmz55/RMZ55_0163-0172.pdf.
- [9] Y.C. Chen, Y.S. Liao. Study on wear mechanism in drilling of Inconel 718 superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, 140, stránky 269-273.
- [10] Astakhov, Viktor P. *DRILLS - Science and Technology of Advanced Operations*. Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2014. ISBN: 978-1-4665-8434-1.
- [11] *Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718*. A.R.C. Sharman, A. Amarasinghe, K. Ridgway. 200, Sheffield : Univeristy of Sheffield, 2008, Journal Of Materials Processing Technology , Sv. 1-3, stránky 424-432.
- [12] ISO 3685. *Tool life testing with single point turning tools*. 1990.
- [13] SHM, s.r.o. *www.shm-cz.cz. SHM-CZ*. [Online] [Citace: 9. 5 2017.] <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoatings-cr/>.
- [14] ZČU, KTO -. *www.kto.zcu.cz*. [Online] [Citace: 9. 5 2017.] http://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni_katedry/merici_vybaveni_KTO.html.

7 Seznam obrázků

Obr. 1 - Transformační diagram Inconelu 718. [7]	14
Obr. 2 - Tahový diagram žíhaného (modrá čára) a tvrzeného (červená čára) Inconelu 718. [8]	15
Obr. 3 - Mikrostruktura Inconelu 718	15
Obr. 4 - Porovnání nástrojových materiálů (tvrdost-ohybová pevnost). [10]	17
Obr. 5 - Metody zpracování práškové oceli [10]	18
Obr. 6 - mikrostruktura lité HSS (nahore) a práškové HSS (dole) [10].....	19
Obr. 7 - Vliv velikosti závady iniciující trhliny na pevnost v ohybu [10]	19
Obr. 8 - Závislost trvanlivosti vrtáku na vrchol. úhlu [9]	21
Obr. 9 - Opotřebenění vrtáků s vrstvou TiAlN [9].....	21
Obr. 10 - Druhy tvarů geometrií pro aplikaci vrtání superslitin [11].....	22
Obr. 11 - Vyhodnocování opotřebenění břitů nástroje. [12]	24
Obr. 12 - Stroj MCV 750-A	26
Obr. 13 - Vybroušený vrták připravený pro experiment	27
Obr. 14 - Označení nástrojů laserem	27
Obr. 15 - 3D analýza břitů.....	28
Obr. 16 - 4-složkový obr. dynamometr Kistler	29
Obr. 17 - Zaznamenávací zařízení pro měření silového zatížení	30
Obr. 18 – Optický mikroskop Multicheck 500 pro vyhodnocování opotřebenění s příslušenstvím	30
Obr. 19 - Schéma prvního experimentu	31
Obr. 20 - Schéma druhého experimentu.....	32
Obr. 21 - Destruovaná geometrie nástrojů	34
Obr. 22 - Stav břitů při dosažení mezního opotřebenění (1-B).....	37
Obr. 23 - Nalepení třísky na nástroj z M4 (1-B).....	37
Obr. 24 - Předvrtání děr.....	39
Obr. 25 - Břit nástroje z materiálu T15 po 1. díře (vlevo) a po 2. díře (vpravo). Experiment 2-A....	40
Obr. 26 - Břit nástroje z M4 po 1. díře (2-A).....	41
Obr. 27 – Stav břitů po dosažení mezního opotřebenění (2-B)	44
Obr. 28 - Stav břitů po první díře (experiment 2-B)	46
Obr. 29 - Nalepená tříska na nástroji z materiálu M4 s tenkou vrstvou (2-B)	51
Obr. 30 - Nalepená tříska na nástroji z materiálu M4 bez tenké vrstvy (2-A)	51
Obr. 31 - EDS analýza vrtáku	51
Obr. 32 - Mikrostruktura použitých substrátů	52
Obr. 33 - Odhalené karbidy na břitu	53
Obr. 34 - Povrch třísky vzniklé vrtáním.....	53
Obr. 35 - Struktura obrobeného materiálu (vrtáno nástrojem z T15).....	54
Obr. 36 - Struktura obrobeného materiálu (vrtáno nástrojem z R76)	54

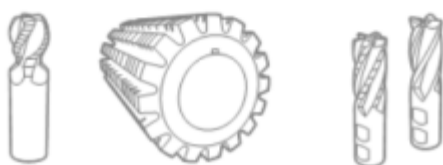
8 Přílohy

8.1 Příloha č. 1

(Materiálový list substrátu R76)

NÁSTROJOVÁ OCEL CPM® REX 76

Certifikace dle ISO 9001



CHEMICKÉ SLOŽENÍ							
C	Cr	V	Mo	W	Co	Mn	Si
1,50%	3,75 %	3,10 %	5,25%	10,00%	9,00%	0,30 %	0,30%

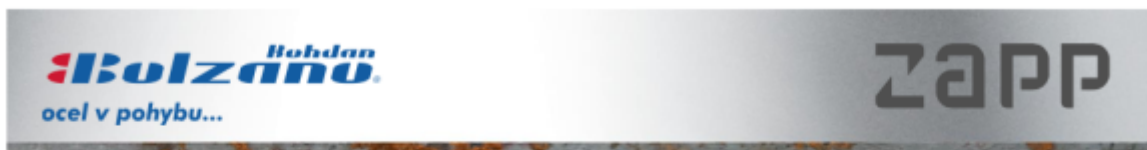
CPM® REX 76

je vysokovýkonná rychlořezná ocel, vyráběná společností Crucible (USA) metodou práškové metalurgie. Z tohoto důvodu vykazuje CPM® Rex 76 lepší obrobiteľnosť broušením a vyšší houževnatost než srovnatelné konvenční rychlořezné oceli. Vysoký obsah uhlíku, vanadu a kobaltu způsobuje stejně tak vysokou otěruvzdornost jakou dosahuje CPM® Rex T15, navíc však CPM® Rex 76 vyniká vysokou tvrdostí za tepla. CPM® Rex 76 je možno tepelně zpracovat až na tvrdost 70 HRc. Vysoká tvrdost, jemné austenitické zrno a jemně disperzní rozdělení karbidů umožňují hospodárné použití CPM® Rex 76 při výrobě speciálních nástrojů pro obrábění těžce obrobiteľných materiálů.

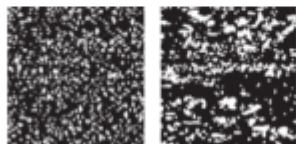
Typické oblasti použití

- odvalovací frézy a čepové frézy
- protahovací trny
- závitníky a šroubovitě vrtáky
- výstružníky
- vícebřitě nástroje
- nástroje s vysokými požadavky na tvrdost za tepla
- nástroje pro přesné stříhání

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI		
Modul pružnosti E [kN/mm ²]	218	
Hustota [kg/dm ³]	8,26	
Tepelná vodivost [W/mk]	24,2	
Koeficient teplotní roztažnosti v rozsahu teplot [mm/mm °C]	40 - 540 °C [mm/mm °C]	10,9 x 10 ⁻⁶

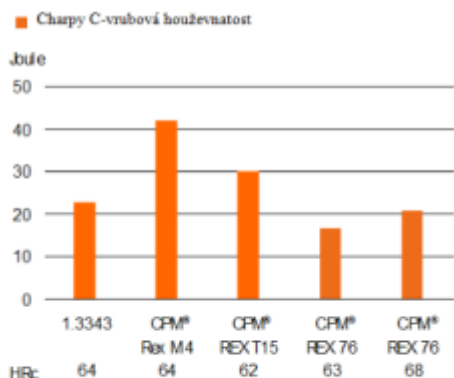


Struktury materiálů vyrobených práškovou a konvenční metalurgií



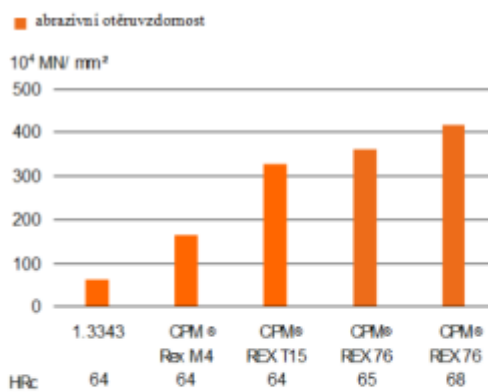
Srovnání homogenní struktury práškovou metalurgií vyrobeného materiálu s hrubou karbidickou strukturou konvenční metalurgií vyrobené oceli.

HOUŽEVNATOST



Standardní vzorek pro Charpy-Test s rádiusem vrubu 12,7 mm

OTĚRUVZDORNOST



Recipročně k množství při zkoušce abrazivní odolnosti obroušeného materiálu, suchý kontakt kotouče s rotujícím válcem ze slinutého karbidu.

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Žihání na měkko

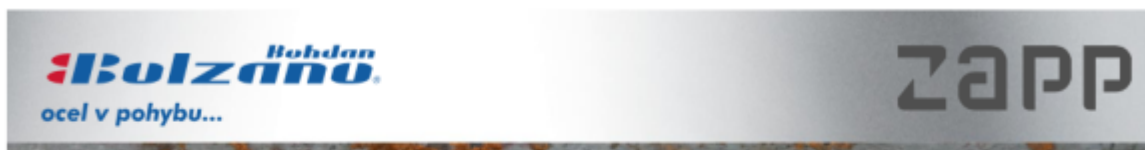
Dílec z oceli CPM® Rex 76 se stejnoměrně ohřeje na teplotu 860-870 °C. Následuje výdrž na této teplotě po dobu 2 hodin a poté ochlazení v peci rychlostí 10 °C za hodinu na teplotu 550°C. Dochlazení na klidném vzduchu. Ve stavu po žihání na měkko má ocel CPM® Rex T15 tvrdost cca. 285/310 HB.

Žihání na snížení prnutí

Doporučuje se provádět po obrobení na hrubo, ohřevem na 600–700 °C. Po důkladném prohřátí ochladit v peci na cca. 500 °C. Konečné dochlazení na klidném vzduchu.

Kalení

Při kalení CPM® Rex 76 jsou obvykle prováděny dva až tři předeřevy (450 – 500 °C/ 850 – 900 °C/ 1050°C). Následuje ohřev na požadovanou austenitizační teplotu 1150–1200°C. Teplota 1150 °C se volí při požadavku na maximální houževnatost a 1200 °C k docílení nejvyšší otěruvzdornosti. Výdrže by měly být upraveny pro velké nebo naopak tenkostěnné nástroje, dle zkušeností a zásad platných pro rychlořezné oceli.



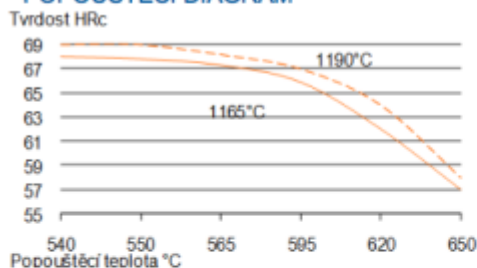
Ochlazování

Může být prováděno na vzduchu, v lázni nebo lomené v oleji. Při kalení ve vakuu musí být dbáno na dostatečnou rychlost ochlazování (přetlak min. 5 bar). Při požadavku na velkou houževnatost se doporučuje ochlazení v lázni při cca. 550°C.

Popouštění

Je nutno provést okamžitě poté, co teplota nástroje klesne na 40 °C. Je třeba popustit třikrát, každý cyklus s výdrží dvě hodiny. CPM® Rex 76 se obvykle popouští při teplotách 540 °C až 590°C.

POPOUŠTĚCÍ DIAGRAM



DATA PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

1. předehřev	450–500 °C
2. předehřev	850–900 °C
kalení	podle tabulky
popouštění	3 x 2 hodiny podle tabulky

Ochlazení po kalení v solné lázni při cca. 550 °C
nebo ve vakuu s přetlakem min. 5 bar

POŽADOVANÁ TVRDOST HRC ± 1	KALICÍ TEPLOTA °C	VÝDRŽ NA KALICÍ TEPLOTĚ MINUT*	POPOUŠTĚNÍ °C
68	1150	25	550
67	1150**	25	565
68	1170	20	540
67	1170	20	565
66	1170	20	590
69	1190	15	540
68	1190***	15	565
67	1190	15	590
70	1200	15	540

* Byl-li předtím proveden předehřev při 870 °C.

Data se vztahují na vzorek s průměrem 13 mm. Výdrže na kalicí teplotě musí být upraven pro tlusté nebo naopak velmi tenké průřezy. Nesmí být překročena maximální teplota 1205 °C. Výdrž v Sec/mm tloušťky stěny.

** nejlepší houževnatost

*** nejlepší kombinace ořezuvzdornost / tvrdost za tepla / houževnatost



MECHANICKÉ OPRACOVÁNÍ

Soustružení

ŘEZNÉ PARAMETRY	SOUSTRUŽENÍ SLINUTÝMI KARBIDY HRUBOVÁNÍ	SOUSTRUŽENÍ SLINUTÝMI KARBIDY DOKONČOVÁNÍ	SOUSTRUŽENÍ RYCHLOŘEZNOU OCELÍ, DOKONČOVÁNÍ
Řezná rychlost (V_c) m/min.	80–110	110–140	15
Posuv (f) mm/ot	0,2–0,4	0,05–0,2	0,05–0,3
Hloubka řezu (a_p) mm	2–4	0,05–2	0,5–3
Skupina ISO	P 10–P 20*	P 10*	–

* Jsou doporučeny SK povlakované, např. Sandvik Coromat 4015 nebo SECO TP 100.

FRÉZOVÁNÍ

Válcové a čelní frézy

ŘEZNÉ PARAMETRY	FRÉZOVÁNÍ SLINUTÝMI KARBIDY HRUBOVÁNÍ	FRÉZOVÁNÍ SLINUTÝMI KARBIDY DOKONČOVÁNÍ	FRÉZOVÁNÍ RYCHLOŘEZNOU OCELÍ, DOKONČOVÁNÍ
Řezná rychlost (V_c) m/min.	60–80	80–110	15
Posuv (f) mm/ot	0,2–0,4	0,1–0,2	0,05–0,3
Hloubka řezu (a_p) mm	2–5	1–2	1–3
Skupina ISO	K 15*	K 15*	–

* Jsou doporučeny SK povlakované, např. Sandvik Coromat 4015 nebo SECO TP 100.

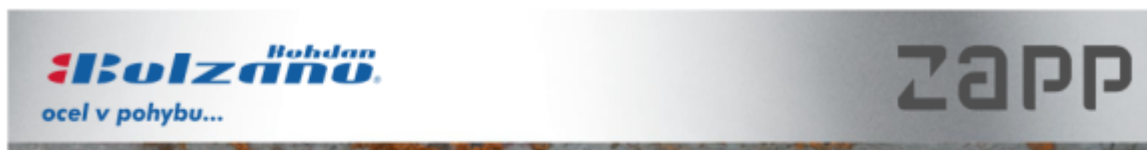
Čepové frézy

ŘEZNÉ PARAMETRY	TYP FRÉZY:		FRÉZOVÁNÍ RYCHLOŘEZNOU OCELÍ, DOKONČOVÁNÍ
	MONOLITICKÁ SK NÁSTROJ	S VÝMĚNNÝMI SK DESTIČKAMI	
Řezná rychlost (V_c) m/min.	45–55	50–70	12*
Posuv (f) mm/ot	0,01–0,20**	0,06–0,20**	0,01–0,30**
Skupina ISO	K 20	P 25***	–

* Pro TiCN – povlakované čepové frézy z rychlořezné oceli VC – 25–30 m/Min.

** V závislosti na radiální hloubce řezu a průměru frézy.

*** Jsou doporučeny SK povlakované, např. Sandvik Coromat GC 3015 nebo SECO T 15 M



VRTÁNÍ

Šroubovité vrtáky z rychlořezné oceli

VRTÁK - ϕ MM	ŘEZNÁ RYCHLOST (V _C) M/MIN.	POSUV (F) MM/U
-5	12-16*	0,05-0,15
5-10	12-16*	0,15-0,25
10-15	12-16*	0,25-0,35
15-20	12-16*	0,35-0,40

*Pro TiCN - povlakované vrtáky z rychlořezné oceli VC ~ 25-30 m/Min

Vrtáky ze slinutých karbidů

ŘEZNÉ PARAMETRY	TYP VRTÁKU: S VÝMĚNNÝMI DESTIČKAMI	MONOLITICKÉ	VRTÁK S CHLADICÍMI KANÁLY A BŘÍTEM Z SK*
Řezná rychlost (V _C) m/min.	70-90	40-60	35
Posuv (f) mm/ot	0,08-0,14**	0,10-0,15**	0,10-0,20**

*Vrták s chladicími kanály a s pájeným břítem z SK.

**V závislosti na průměru vrtáku

BROUŠENÍ

DRUH BROUŠENÍ	ŽÍHÁNO NA MĚKKO	KALENO
na plocho, brusným kotoučem	A 13 HV	B 107 R75 B3* 3SG 46 GVS** A 46 GV
na plocho, brusnými segmenty	A 24 GV	3SG 36 HVS**
na kulato, vnější	A 60JV	B126 R75 B3* 3SG 60 KVS** A 60 IV
na kulato, vnitřní	A 46 JV	B126 R75 B3* 3SG 80 KVS** A 60 HV
profilové	A 100 LV	B126 R100 B6* 5SG 80 KVS** A 120 JV

*Podle možnosti by měly být použity CBN-kotouče.

**Brusné kotouče firmy Norton Co.

8.2 Příloha č. 2
(Materiálový list substrátu T15)



NÁSTROJOVÁ OCEL CPM® REX T15

Certifikace dle ISO 9001



CHEMICKÉ SLOŽENÍ

C	Cr	V	Mo	W	Co	Mn	Si
1,60%	4,00 %	5,00 %	Max. 1,00%	12,25%	5,00%	0,30%	0,30%

CPM® REX T15

je vysokovýkonná rychlořezná wolframová ocel, s vysokým obsahem uhlíku, vanadu a kobaltu. Vyznačuje se velkou tvrdostí, vynikající otěruvzdorností a dobrou tvrdostí za tepla. CPM® Rex T 15 je vyráběna společností Crucible (USA) metodou práškové metalurgie. Z tohoto důvodu vykazuje CPM® Rex T15 lepší obrobitelnost broušením a vyšší houževnatost než konvenční rychlořezná ocel S12-1-4-5 (1.3202). CPM® Rex T15 je přednostně nasazována při vysokých požadavcích na výkonnost, zejména jsou-li obráběny těžce obrobitelné materiály.

Typické oblasti použití

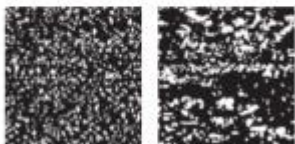
- odvalovací frézy
- čepové frézy
- protahovací trny
- závitníky a šroubovitě vrtáky
- výstružníky
- střížné a lisovací nástroje
- nástroje pro přesné stříhání
- protlačování

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Modul pružnosti E [kN/mm ²]	218
Hustota [kg/dm ³]	8,19
Tepelná vodivost[W/mk]	24,2
Koeficient teplotní roztažnosti v rozsahu teplot 40 - 540 °C [mm/mm °C]	11,95 x 10 ⁻⁶

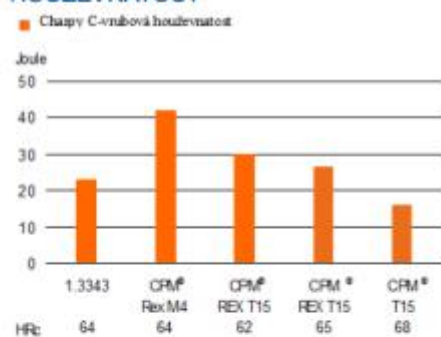


Struktury materiálů vyrobených práškovou a konvenční metalurgií



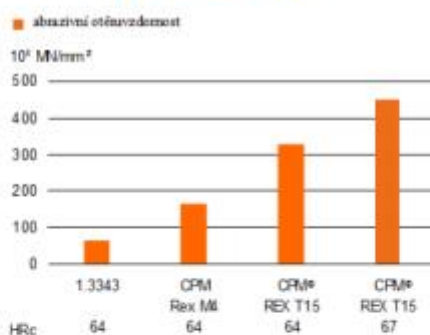
Srovnání homogenní struktury práškovou metalurgií vyrobeného materiálu s hrubou karbidickou strukturou konvenční metalurgií vyrobené oceli

HOUŽEVNATOST



Standardní vzorek pro Charpy-Test s
rádiusem vrubu 12,7 mm

OTĚRUVZDORNOST



Recipročně k množství při zkoušce abrazivní
odolnosti obroušeného materiálu, suchý kontakt
kotouče s rotujícím válcem ze slinutého
karbidu

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Žihání na měkko

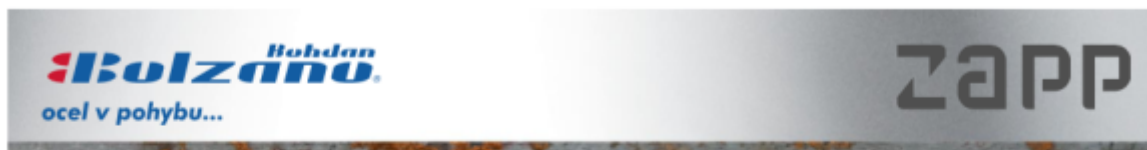
Dílec z oceli CPM® Rex T15 se rovnoměrně ohřeje na teplotu 860-870 °C. Následuje výdrž na této teplotě po dobu 2 hodin a poté ochlazení v peci rychlostí 10 °C za hodinu na teplotu 550°C. Dochlazení na klidném vzduchu. Ve stavu po žihání na měkko má ocel CPM® Rex T15 tvrdost cca. 245/275 HB.

Žihání na snížení prnutí

Doporučuje se provádět po obrobení na hrubo, ohřevem na 600–700 °C. Po důkladném prohřátí ochladit v peci na cca. 500 °C. Konečné dochlazení na klidném vzduchu.

Kalení

Při kalení CPM® Rex T15 jsou obvykle prováděny dva až tři předeřevy (450 – 500 °C/ 850 – 900 °C/ 1000°C). Následuje ohřev na požadovanou austenitizační teplotu 1180 – 1200 °C. Teplota 1160 °C se volí při požadavku na maximální houževnatost a 1230 °C k docílení nejvyšší otěruvzdornosti. Výdrže by měly být upraveny pro velké nebo naopak tenkostěnné nástroje, dle zkušeností a zásad platných pro rychlořezné oceli.



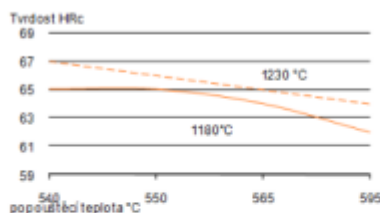
Ochlazování

Může být prováděno na vzduchu, v lázni nebo lomené v oleji. Při kalení ve vakuu musí být dbáno na dostatečnou rychlost ochlazování (přetlak min. 5 bar). Při požadavku na velkou houževnatost se doporučuje ochlazení v lázni při cca. 550°C.

Popouštění

Je nutno provést okamžitě poté, co teplota nástroje klesne na 40 °C. Je třeba popustit třikrát, každý cyklus s výdrží dvě hodiny. CPM® Rex T15 se obvykle popouští při teplotách 540 °C až 590°C.

POPOUŠTĚCÍ DIAGRAM



DATA PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

1. předehřev	450–500 °C
2. předehřev	850–900 °C
kalení	podle tabulky
popouštění	3 x 2 hodiny při 560°C

Ochlazení po kalení v solné lázni při cca. 550 °C
nebo ve vakuu s přetlakem min. 5 bar

POŽADOVANÁ TVRDOST HRC ± 1	KALICÍ TEPLOTA °C	VÝDRŽ NA KALICÍ TEPLOTĚ SEKUND*	POPOUŠTĚNÍ °C
62	1160	20	590
64	1160	20	560
65	1160	20	540
65	1180**	20	550
64	1180**	20	565
62	1180	20	590
66	1200	15	540
65	1200	15	565
67	1230***	10	540
66	1230	10	560
64	1230	10	590

* Byl-li předtím proveden předehřev při 870 °C.

Data se vztahují na vzorek s průměrem 13 mm. Výdrže na kalicí teplotě musí být upraven pro tlusté nebo naopak velmi tenké průřezy. Nesmí být překročena maximální teplota 1240 °C. Výdrž v Sec/mm tloušťky stěny.

** nejlepší houževnatost

*** nejlepší kombinace otěruvzdornost / tvrdost za tepla / houževnatost



MECHANICKÉ OPRACOVÁNÍ

Soustružení

ŘEZNÉ PARAMETRY	SOUSTRUŽENÍ SLINUTÝMI KARBIDY HRUBOVÁNÍ	SOUSTRUŽENÍ SLINUTÝMI KARBIDY DOKONČOVÁNÍ	SOUSTRUŽENÍ RYCHLOŘEZNOU OCELÍ, DOKONČOVÁNÍ
Řezná rychlost (V_c) m/min.	60–90	90–110	6-10
Posuv (f) mm/ot	0,2–0,4	0,05–0,2	0,05–0,3
Hloubka řezu (a_p) mm	2–4	0,05–2	0,5–3
Skupina ISO	P 10–P 20*	P 10*	–

* Jsou doporučeny SK povlakované, např. Sandvik Coromat 4015 nebo SECO TP 100.

FRÉZOVÁNÍ

Válcové a čelní frézy

ŘEZNÉ PARAMETRY	FRÉZOVÁNÍ SLINUTÝMI KARBIDY HRUBOVÁNÍ	FRÉZOVÁNÍ SLINUTÝMI KARBIDY DOKONČOVÁNÍ	FRÉZOVÁNÍ RYCHLOŘEZNOU OCELÍ, DOKONČOVÁNÍ
Řezná rychlost (V_c) m/min.	40–60	60–80	15
Posuv (f) mm/ot	0,2–0,4	0,1–0,2	0,05-0,3
Hloubka řezu (a_p) mm	2–5	1–2	1–3
Skupina ISO	K 15*	K 15*	–

* Jsou doporučeny SK povlakované, např. Sandvik Coromat 4015 nebo SECO TP 100.

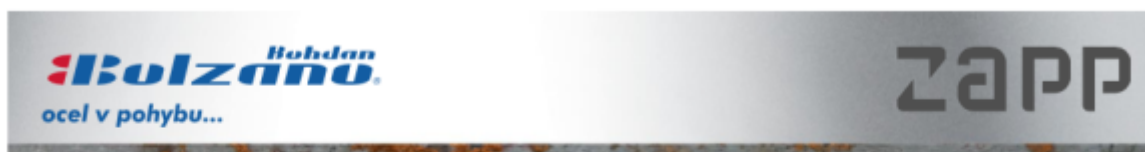
Čepové frézy

ŘEZNÉ PARAMETRY	TYP FRÉZY: MONOLITICKÁ SK NÁSTROJ	S VÝMĚNNÝMI SK DESTIČKAMI	FRÉZOVÁNÍ RYCHLOŘEZNOU OCELÍ, DOKONČOVÁNÍ
Řezná rychlost (V_c) m/min.	45–55	50–70	12*
Posuv (f) mm/ot	0,01–0,20**	0,06–0,20**	0,01–0,30**
Skupina ISO	K 20	P 25***	–

* Pro TiCN – povlakované čepové frézy z rychlořezné oceli $V_C \sim 25-30$ m/Min.

** V závislosti na radiální hloubce řezu a průměru frézy.

*** Jsou doporučeny SK povlakované, např. Sandvik Coromat GC 3015 nebo SECO T 15 M



VRTÁNÍ

Šroubovité vrtáky z rychlořezné oceli

VRTÁK - ϕ MM	ŘEZNÁ RYCHLOST (V_C) M/MIN.	POSUV (F) MM/U
-5	10-14*	0,05-0,15
5-10	10-14*	0,15-0,25
10-15	10-14*	0,25-0,35
15-20	10-14*	0,35-0,40

*Pro TiCN - povlakované vrtáky z rychlořezné oceli $V_C \sim 25-30$ m/Min

Vrtáky ze slinutých karbidů

ŘEZNÉ PARAMETRY	TYP VRTÁKU:		VRTÁK S CHLADICÍMI KANÁLY A BŘÍTEM Z SK*
	S VÝMĚNNÝMI DESTIČKAMI	MONOLITICKÉ	
Řezná rychlost (V_C) m/min.	70-90	40-60	35
Posuv (f) mm/ot	0,08-0,14**	0,10-0,15**	0,10-0,20**

*Vrták s chladicími kanály a s pájeným břítem z SK

**V závislosti na průměru vrtáku

BROUŠENÍ

DRUH BROUŠENÍ	ŽÍHÁNO NA MĚKKO	KALENO
na plocho, brusným kotoučem	A 13 HV	B 107 R75 B3* 3SG 46 GVS** A 46 GV
na plocho, brusnými segmenty	A 24 GV	3SG 36 HVS**
na kulato, vnější	A 60JV	B126 R75 B3* 3SG 60 KVS** A 60 IV
na kulato, vnitřní	A 46 JV	B126 R75 B3* 3SG 80 KVS** A 60 HV
profilové	A 100 LV	B126 R100 B6* 5SG 80 KVS** A 120 JV

*Podle možnosti by měly být použity CBN-kotouče.

**Brusné kotouče firmy Norton Co.

8.3 Příloha č. 3
(Materiálový list substrátu M4)

NÁSTROJOVÁ OCEL CPM® REX M4

Certifikace dle ISO 9001



CHEMICKÉ SLOŽENÍ						
C	Cr	V	Mo	W	Si	Mn
1,35%	4,25 %	4,00 %	4,50%	5,75%	0,30%	0,30%

CPM® REX M4

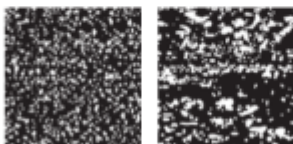
Pro speciální aplikace vyvinutá vysokovýkonná rychlořezná ocel. Svoji koncepcí zaručuje u nástrojů vysokou otěruvzdornost a stabilitu řezné hrany. CPM® Rex M4 je vyráběna společností Crucible (USA) metodu práškové metalurgie. Vysoký obsah vanadu a uhlíku způsobuje, že nástroje z ní vyrobené (lisovací, tvářecí, jakož i řezné) vykazují vysokou životnost popř. umožňují obrábění vysokými řeznými rychlostmi. CPM® Rex M4 se vyznačuje vyšší otěruvzdorností než S6-5-2 nebo S6-5-3. Výroba metodou Crucible Particle Metallurgy process dává oceli CPM® Rex M4 do vlnku lepší obrobitelnost broušením než mají konvenční oceli S6-5-3 a vyšší houževnatost než vykazuje konvenční S6-5-2.

Typické oblasti použití

- střížné a lisovací nástroje
- nástroje pro přesné stříhání
- nástroje pro tváření
- rotační nástroje, válce pro válcování závitů
- razníky pro děrování
- průmyslové nože a nůžky
- sintrovací nástroje
- frézy, protahovací tmy
- závitníky

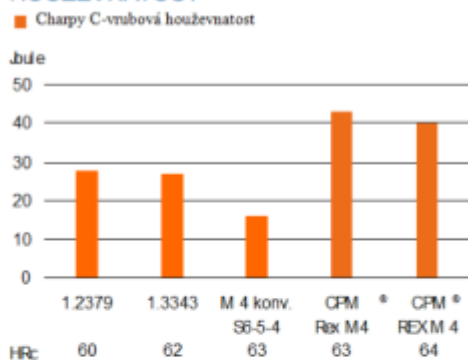
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI		
Modul pružnosti E [kN/mm ²]		230
Hustota [kg/dm ³]		7,97
Tepelná vodivost[W/mk]		24,3
Koeficient teplotní roztažnosti v rozsahu teplot	40 - 540 °C [mm/mm °C]	12,25 x 10 ⁻⁶

Struktury materiálů vyrobených práškovou a konvenční metalurgií



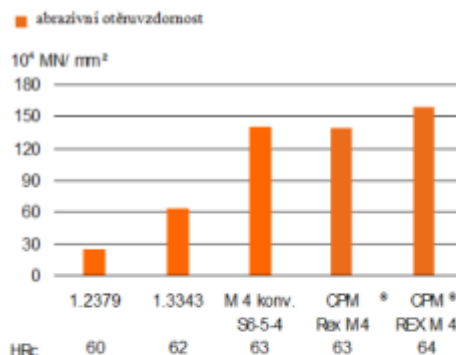
Srovnání homogenní struktury práškovou metalurgií vyrobeného materiálu s hrubou karbidickou strukturou konvenční metalurgií vyrobené oceli

HOUŽEVNATOST



Standardní vzorek pro Charpy-Test s
rádiusem vrubu 12,7 mm

OTĚRUVZDORNOST



Recipročně k množství při zkoušce abrazivní
odolnosti obroušeného materiálu, suchý kontakt
kotouče s rotujícím válcem ze slinutého
karbidu

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Žihání na měkko

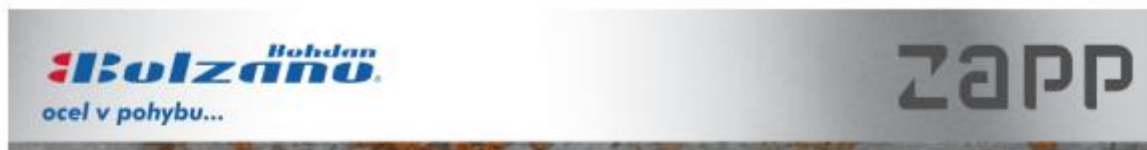
Dílec z oceli CPM® Rex M4 se stejnoměrně ohřeje na teplotu 900 °C. Následuje výdrž na této teplotě po dobu 2 hodin a poté ochlazení v peci rychlostí 5 °C za hodinu na teplotu 540°C. Dochlazení na klidném vzduchu. Ve stavu po žihání na měkko má ocel CPM® Rex M4 tvrdost cca. 245 HB.

Žihání na snížení prnutí

Doporučuje se provádět po obrobení na hrubo, ohřevem na 600–700 °C. Po důkladném prohřátí ochladit v peci na cca. 500 °C. Konečné dochlazení na klidném vzduchu.

Kalení

Při kalení CPM® Rex M4 jsou obvykle prováděny dva předehřevy (450 – 500 °C/ 850 – 900 °C). Následuje ohřev na austenitizační teplotu 1090 – 1200 °C. Teplota 1090 °C se volí při požadavku na maximální houževnatost a 1200 °C k docílení nejvyšší otěruvzdornosti. Horní rozsah kalicích teplot (1170-1200°C) by měl být volen pro řezné nástroje. Výdrže by měly být upraveny pro velké nebo naopak tenkostěnné nástroje, dle zkušeností a zásad platných pro rychlořezné oceli.



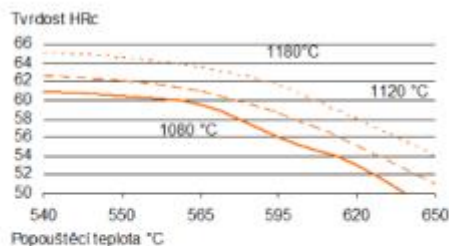
Ochlazování

Může být prováděno na vzduchu, v lázni nebo lomené v oleji. Při kalení ve vakuu musí být dbáno na dostatečnou rychlost ochlazování (přetlak min. 5 bar). Při požadavku na velkou houževnatost se doporučuje ochlazení v lázni při cca. 550°C..

Popouštění

Je nutno provést okamžitě poté, co teplota nástroje klesne na 40 °C. Je třeba popustit třikrát, každý cyklus s výdrží dvě hodiny. CPM® Rex M4 se obvykle popouští při konstantní teplotě 560 °C.

POPOUŠTĚCÍ DIAGRAM



DATA PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

1. předehřev	450–500 °C
2. předehřev	850–900 °C
kalení	podle tabulky
popouštění	3 x 2 hodiny při 560°C

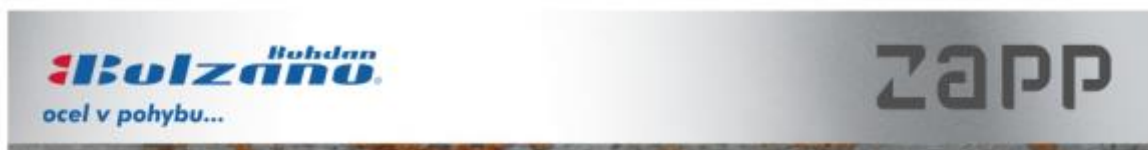
Ochlazení po kalení v solné lázni při cca. 550 °C
nebo ve vakuu s přetlakem min. 5 bar

POŽADOVANÁ TVRDOST HRC ± 1	KALICÍ TEPLOTA °C	VÝDRŽ NA KALICÍ TEPLOTĚ SEKUND*	POPOUŠTĚNÍ °C
59	1090	35	560
60	1100	35	560
61	1120	35	560
62	1140	25	560
63	1160	20	560
64	1180	15	560
65	1200	10	560

Byl-li předtím proveden předehřev při 870 °C.

Data se vztahují na vzorek s průměrem 13 mm. Výdrže na kalicí teplotě musí být upraven pro tlusté nebo naopak velmi tenké průřezy. Nesmí být překročena maximální teplota 1200 °C.

Výdrže se rozumí v Sec./mm tloušťky stěny



MECHANICKÉ OPRACOVÁNÍ

Soustružení

ŘEZNÉ PARAMETRY	SOUSTRUŽENÍ SLINUTÝMI KARBIDY HRUBOVÁNÍ	SOUSTRUŽENÍ SLINUTÝMI KARBIDY DOKONČOVÁNÍ	SOUSTRUŽENÍ RYCHLOŘEZNOU OCELÍ, DOKONČOVÁNÍ
Řezná rychlost (V_c) m/min.	70–90	90–130	15
Posuv (f) mm/ot	0,2–0,4	0,05–0,2	0,05–0,3
Hloubka řezu (a_p) mm	2–4	0,05–2	0,5–3
Skupina ISO	P 10–P 20*	P 10*	–

* Jsou doporučeny SK povlakované, např. Sandvik Coromat 4015 nebo SECO TP 100.

FRÉZOVÁNÍ

Válcové a čelní frézy

ŘEZNÉ PARAMETRY	FRÉZOVÁNÍ SLINUTÝMI KARBIDY HRUBOVÁNÍ	FRÉZOVÁNÍ SLINUTÝMI KARBIDY DOKONČOVÁNÍ	FRÉZOVÁNÍ RYCHLOŘEZNOU OCELÍ, DOKONČOVÁNÍ
Řezná rychlost (V_c) m/min.	70–90	90–130	15
Posuv (f) mm/ot	0,2–0,3	0,1–0,2	0,1
Hloubka řezu (a_p) mm	2–4	1–2	1–2
Skupina ISO	K 15*	K 15*	–

* Jsou doporučeny SK povlakované, např. Sandvik Coromat 4015 nebo SECO TP 100.

Čepové frézy

ŘEZNÉ PARAMETRY	TYP FRÉZY:		FRÉZOVÁNÍ RYCHLOŘEZNOU OCELÍ, DOKONČOVÁNÍ
	MONOLITICKÁ SK NÁSTROJ	S VÝMĚNNÝMI SK DESTIČKAMI	
Řezná rychlost (V_c) m/min.	20–35	50–80	12*
Posuv (f) mm/ot	0,01–0,20**	0,06–0,20**	0,01–0,30**
Skupina ISO	K 20	P 25***	–

* Pro TiCN – povlakované čepové frézy z rychlořezné oceli $V_C \sim 25-30$ m/Min

** V závislosti na radiální hloubce řezu a průměru frézy.

*** Jsou doporučeny SK povlakované, např. Sandvik Coromat GC 3015 nebo SECO T 15 M



VRTÁNÍ

Šroubovitě vrtáky z rychlořezné oceli

VRTÁK - ϕ MM	ŘEZNÁ RYCHLOST (V_c) M/MIN.	POSUV (F) MM/U
-5	8-14*	0,05-0,15
5-10	8-14*	0,15-0,25
10-15	8-14*	0,25-0,35
15-20	8-14*	0,35-0,40

*Pro TiCN - povlakované vrtáky z rychlořezné oceli V_c - 25-30 m/Min.

Vrtáky ze slinutých karbidů

ŘEZNÉ PARAMETRY	TYP VRTÁKU: S VÝMĚNNÝMI DESTIČKAMI	MONOLITICKÉ	VRTÁK S CHLADICÍMI KANÁLY A BŘÍTEM Z SK*
Řezná rychlost (V_c) m/min.	110-130	40	35
Posuv (f) mm/ot	0,08-0,14**	0,10-0,15**	0,10-0,20**

*Vrták s chladicími kanály a s pájeným břítem z SK.

**V závislosti na průměru vrtáku

BROUŠENÍ

DRUH BROUŠENÍ	ŽÍHÁNO NA MĚKKO	KALENO
na plocho, brusným kotoučem	A 13 HV	B 107 R75 B3* 3SG 46 GVS** A 46 GV
na plocho, brusnými segmenty	A 24 GV	3SG 36 HVS**
na kulato, vnější	A 60JV	B126 R75 B3* 3SG 60 KVS** A 60 IV
na kulato, vnitřní	A 46 JV	B126 R75 B3* 3SG 80 KVS** A 60 HV
profilové	A 100 LV	B126 R100 B6* 5SG 80 KVS** A 120 JV

*Podle možnosti by měly být použity CBN-kotouče.

**Brusné kotouče firmy Norton Co.

8.4 Příloha č. 4

(Materiálový list Inconelu 718 – test do plna)

VDM Metals GmbH
on behalf of VDM Metals International GmbH

VDM Metals

Enclosure 1 for inspection certificate 143793/1
DIN EN 10204/01.05 3.1
Order No. Delivery No. Purchase Order No.
473207 11053

Page 1 of 4
printed: 27. JUL 2016

Hardness Test						
solution ann. / age hardened		ASTM E10 - 14				
Lot	Sample No.	Location	Method	Values		
104439369	3E-A1	surface	HBN 10/3000	382	363	363
solution ann. / age hardened		ASTM E18 - 15				
Lot	Sample No.	Location	Method	Values		
104439369	1-A1	surface	HRC	38	38	38
solution ann. / age hardened		ASTM E18 - 15				
Lot	Sample No.	Location	Method	Values		
104439369	1-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	2-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	37	37	39
104439369	3-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	4-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	38	40
104439369	5-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	40	40	40
104439369	6-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	37	40	39
104439369	7-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	40	40
104439369	8-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	40
104439369	9-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	40	38
104439369	10-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	38	38
104439369	11-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	39
104439369	12-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	37	38	39
104439369	13-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	39
104439369	14-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	40	40	39
104439369	15-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	40	39
104439369	16-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	38	39
104439369	17-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	37	39
104439369	18-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	37	37	40
104439369	19-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	40	39
104439369	20-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	38	38
104439369	21-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	37	37	38
104439369	22-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	39
104439369	23-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	39
104439369	24-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	40	39
104439369	25-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	39
104439369	26-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	37	39
104439369	27-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	40	40	40
104439369	28-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	38	38
104439369	29-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	37	38	37
104439369	30-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	38	39
104439369	31-A1	Surf.: 0° 130° 240°	HRC	37	36	38
104439369	32-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	33-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	39
104439369	34-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	39
104439369	35-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	40
104439369	36-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	38
104439369	37-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	39
104439369	38-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	39
104439369	39-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	39
104439369	40-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	41-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	38
104439369	42-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	37	38	38

VDM Metals GmbH
Division Bar and Forgings
Pferinger Straße 5, D-94074 Waidhofen
Postfach 1020, D-94074 Waidhofen
Telephone 0039 03-6, Fax 0039 03-62117
Internet: www.vdm-metals.com

Chairman of the Supervisory Board: Dr. Thomas Ludwig
Management Board: Dr. Willy Müller
Andreas Blass, Dr.-Ing. Hans-Joachim Watters
Commercial register: Handelsregister court, R1217
Company domicile: Waidhofen

VDM Metals GmbH
on behalf of VDM Metals International GmbH

VDM Metals

Enclosure 1 for inspection certificate 143793/1
DIN EN 10204/01.05 3.1
Order No. Delivery No. Purchase Order No.
473207 11053

Page 2 of 4
printed: 27. JUL 2016

Hardness Test						
solution ann. / age hardened		ASTM E18 - 15				
Lot	Sample No.	Location	Method	Values		
104439369	43-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	37	37
104439369	44-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	39
104439369	45-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	40
104439369	46-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	47-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	48-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	38
104439369	49-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	38
104439369	50-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	40	40	40
104439369	51-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	40	38
104439369	52-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	37	40	38
104439369	53-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	54-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	39
104439369	55-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	40	40	40
104439369	56-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	39
104439369	57-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	36	37	39
104439369	58-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	39
104439369	59-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	38	39
104439369	60-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	61-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	62-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	39
104439369	63-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	64-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	40	39
104439369	65-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	66-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	38
104439369	67-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	68-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	40	39	38
104439369	69-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	40	40
104439369	70-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	71-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	40
104439369	72-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	40	40	38
104439369	73-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	37	38	38
104439369	74-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	38
104439369	75-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	38
solution ann. / age hardened		ASTM E18 - 15				
Lot	Sample No.	Location	Method	Values		
104439369	1-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
104439369	2-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38	39
104439369	3-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	38	39
104439369	4-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	38	39
104439369	5-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	39	40
104439369	6-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39	40
104439369	7-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	38	40
104439369	8-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	39	40
104439369	9-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	40	39
104439369	10-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	39	40
104439369	11-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39	38
104439369	12-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	38	39
104439369	13-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39	39
104439369	14-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	38	39
104439369	15-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	40	38
104439369	16-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	37	38
104439369	17-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	37	39
104439369	18-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39	39
104439369	19-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	38	38

VDM Metals GmbH
Division Bar and Forgings
Pferinger Straße 5, D-94074 Waidhofen
Postfach 1020, D-94074 Waidhofen
Telephone 0039 03-6, Fax 0039 03-62117
Internet: www.vdm-metals.com

Chairman of the Supervisory Board: Dr. Thomas Ludwig
Management Board: Dr. Willy Müller
Andreas Blass, Dr.-Ing. Hans-Joachim Watters
Commercial register: Handelsregister court, R1217
Company domicile: Waidhofen

VDM Metals GmbH
on behalf of VDM Metals International GmbH

Enclosure 1 for inspection certificate 143793/1
DIN EN 10204/01.05 3.1
Order No. Delivery No. Purchase Order No.
473207 11053

VDM Metals

Page 3 of 4
printed: 27. JUL 2016

Hardness Test					
solution area / age hardened		ASTM E18 - 15			
Lot	Sample No.	Location	Method	Values	
104439300	20-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	38
104439300	21-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	22-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	23-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38
104439300	24-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	40
104439300	25-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	40
104439300	26-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	38
104439300	27-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	39
104439300	28-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	40
104439300	29-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	37
104439300	30-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	31-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	32-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38
104439300	33-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	34-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	35-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	39
104439300	36-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38
104439300	37-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	39
104439300	38-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	38
104439300	39-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	38
104439300	40-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	41-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	42-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	39
104439300	43-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	37
104439300	44-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38
104439300	45-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	46-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	38
104439300	47-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	48-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	49-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	50-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	40
104439300	51-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	52-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	39
104439300	53-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38
104439300	54-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	55-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	39
104439300	56-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38
104439300	57-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	40
104439300	58-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38
104439300	59-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	60-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	61-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	38
104439300	62-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	63-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38
104439300	64-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	65-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	38
104439300	66-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	38
104439300	67-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38
104439300	68-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	69-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	40
104439300	70-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	39
104439300	71-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	39
104439300	72-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	39
104439300	73-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	40	40
104439300	74-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	38
104439300	75-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	39	38

VDM Metals GmbH
Division Bar and Forging
Friedenstraße 10, D-93171 Weiden
Phone: +49 91 87734 Weiden
Telex: +49 91 87734 Weiden
Internet: www.vdm-metals.com

Chairman of the Supervisory Board: Dr. Thomas Ludwig
Management Board: Dr. Rüdiger Müller
Andreas Bauer, Dr.-Ing. Frank-Joachim Weisner
Commercial register: Handelsregister Weiden, HRB 1527
Company domicile: Weiden

VDM Metals GmbH
on behalf of VDM Metals International GmbH

Enclosure 1 for inspection certificate 143793/1
DIN EN 10204/01.05 3.1
Order No. Delivery No. Purchase Order No.
473207 11053

VDM Metals

Page 4 of 4
printed: 27. JUL 2016

Notched Bar Impact Testing									
solution area / age hardened		ASTM E23 - 12aCharpy-V sample / longitudinal / Kix 450/10							
Lot	Sample No.	Temp. °C	KV J	AK [J/cm²]	Linear Expansion [mm]			Shear Fracture [%]	
104439300	1-A1	-50	114	112	1.07	1.21	1.09	29	70

VDM Metals GmbH
Division Bar and Forging
Friedenstraße 10, D-93171 Weiden
Phone: +49 91 87734 Weiden
Telex: +49 91 87734 Weiden
Internet: www.vdm-metals.com

Chairman of the Supervisory Board: Dr. Thomas Ludwig
Management Board: Dr. Rüdiger Müller
Andreas Bauer, Dr.-Ing. Frank-Joachim Weisner
Commercial register: Handelsregister Weiden, HRB 1527
Company domicile: Weiden

VDM Metals GmbH VDM Metals

Enclosure 2

Ultraschallprüfbericht
Ultrasonic Examination Report
Rapport de contrôle U.S.

Besteller Purchase / Client No. Ctr	Bestell-Nr. P.O. No. / No. Commande	Auftrags-Nr. Order No./No. ord	Zugangs-Nr. Certificate No.	Datum Date	Seite Page	Von of
Mahler Ltd	11053	473307	143793	28.01.16	1	1

Lieferform Product / Product	bar
Werkstoff Material / Material	Nicrofer 5219 Nb / VDM® Alloy 718 Nb
Wärmebehandlung Heat Treatment / Treatment thermique	sol. ann. + age hardened
Oberfläche Surface Condition / Aspect surface	machined
Prüfspezifikation Test Specification	NDE 31 Rev. AM / ASTM A 588
Prüfgerät Test Apparatus / Appareil	HOWABO PAT
Ankopplungsmittel Couplant / Agent Couplant	water
Prüftechnik Inspection Technique / Technique	1 straight beam in radial direction 1 straight beam in two directions circumferential
Prüfkopf/Freq./Abm. Type of Probe/Head / Dim. / Probe Head	1 ROWA R 35-T 50 10 Mhz
Prüfungsbereich Scanning Area / Contrôle	100% on all surfaces
Kalibrierung Calibration / Calibration de la sonde	recording sensitivity eq. 50% to 1,5 mm FBH
Methode Method	Test block
Prüfergebnis Test Result / Resultat	No recordable or rejectable indications, the material is in compliance with the test specification

Größe Menge / Dimension Size Qty	Abmessung [mm] Dimension	Charge Nr. Heat No. Caste	Lot-Nr. Lot No.
20	75 15,875 Ø x RL	414615	104439369

Prüfer
Inspector / Inspecteur

Prüfsicht
Operator


Abnahmegesellschaft
Inspecting Authority

Signature


VDM Metals GmbH VDM Metals

Microstructure Examination
Metallography Job No.: 143317
Lot No.: 104439369
Heat: 414615


Inspection Certificate No.: 143793
Enclosure: 4
Page: 1 of 1




100:1 VDM® Alloy 718 / Nicrofer 5219 CTP
1 surface A1
Kallings No.2 22.01.2016 10:12:52




500:1 VDM® Alloy 718 / Nicrofer 5219 CTP
1 surface A1
Kallings No.2 22.01.2016 10:13:19




100:1 VDM® Alloy 718 / Nicrofer 5219 CTP
1 1/4 thickness A1
Kallings No.2 22.01.2016 10:13:40



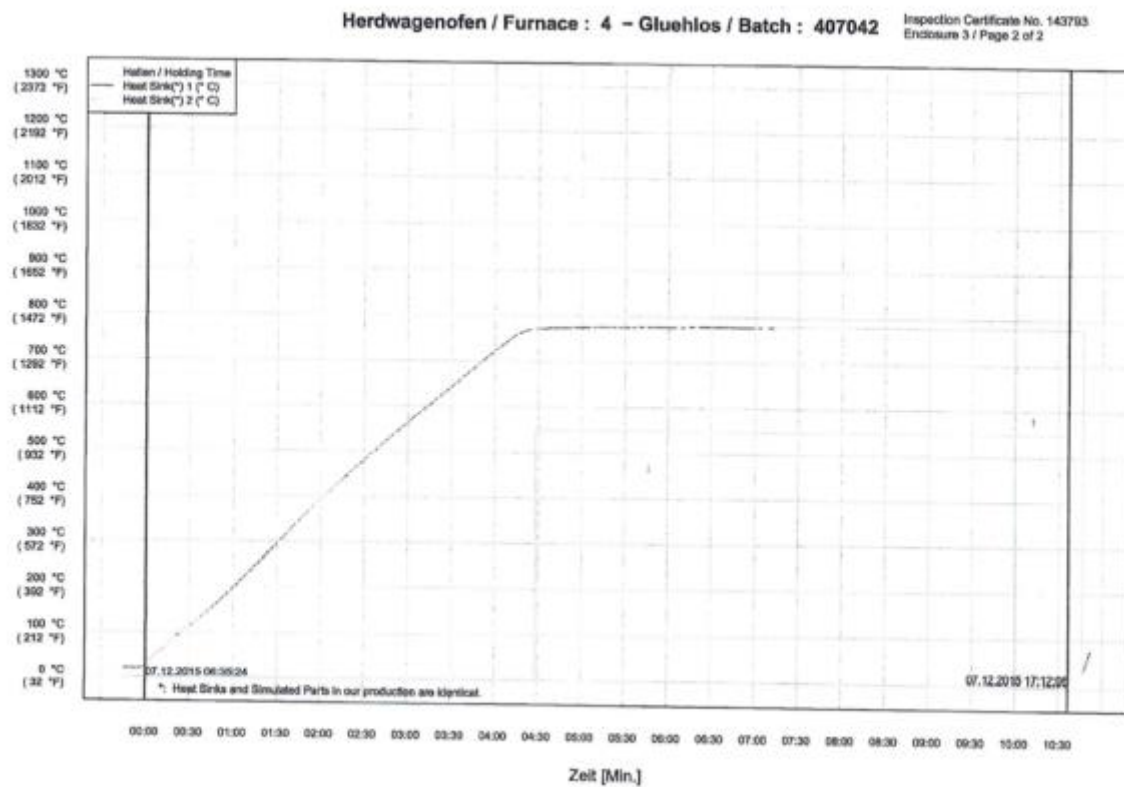
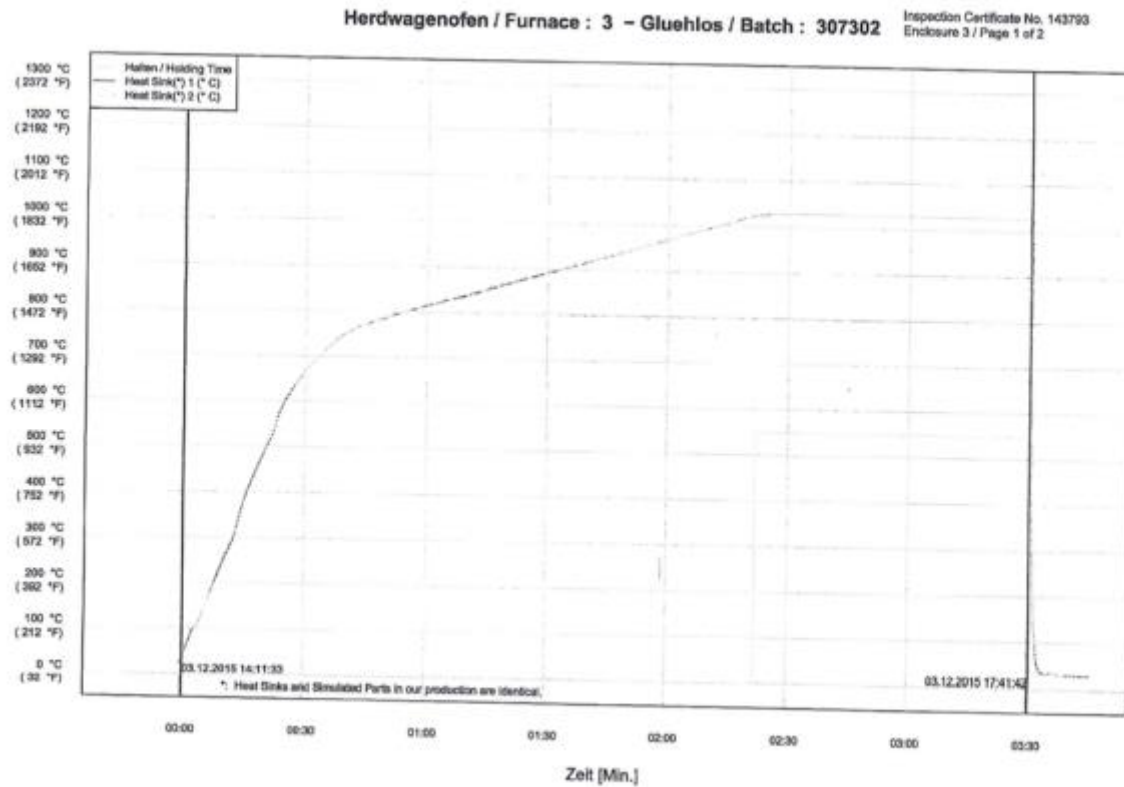
500:1 VDM® Alloy 718 / Nicrofer 5219 CTP
1 1/4 thickness A1
Kallings No.2 22.01.2016 10:14:17



100:1 VDM® Alloy 718 / Nicrofer 5219 CTP
1 center A1
Kallings No.2 22.01.2016 10:14:41



500:1 VDM® Alloy 718 / Nicrofer 5219 CTP
1 center A1
Kallings No.2 22.01.2016 10:15:14



8.5 Příloha č. 5

(Materiálový list Inconelu 718 – test s předvrtáním)

WTE POWERSTEEL s.r.o.
Pražská 449
Kostelec nad Čer. Lesy
31 63

**CERTIFICATE
OF CONFORMITY**
Certificate No: 18980

Západočeská univerzita
v Plzni
Univerzitní 8
306 14 PLZEŇ

	017971-2-1	Requirements
	Z-718-00002485	Alloy 718 Solution Annealed Aged Mschined 120.65mm Dia Bar, 36mm cut length.
	P015310	
Case Order	2114/0163/15	
Reference	21 1009	Specifications
Number	Z0234-3/T-3	NACEMR0175 REV: 2009(E)
Practice	vim/var	
Shipping Certificate	061810/0001	Shipped 10 EA

Chemical Analysis

%	Si	%	Mn	%	P	%	S	%	Al	%	B	%	Bi	%	Ca	%
	0.04		0.08		0.004		0.0005		0.57		0.0026		<.00001		0.0001	
%	Cr	%	Cu	%	Fe	%	Mg	%	Mo	%	Ni	%	Pb	%	Se	%
	17.87		0.03		bal		0.0006		2.99		54.11		<.0001		<.00005	

Mechanical Properties

Tests	Results	Units	Temp	Specification	Location	Direction	Tested On
YS	132	MPa	20 degC			Longitudinal	
Tens	163	MPa					
Reduction of Area	28	%					
Length 4D	43	%					

Tests	Results	Units	Temp	Specification	Location	Direction	Test Type
Impact Energy	54 53 56	Joules	-50 degC			Transverse	Charpy V-notch energy
Expansion	0.019 0.018 0.018	inches					
	100 100 100	%					

Tests	Results	Units	Specification	Location	Performed On
Hard C	38 37	HRC	ASTM E18	Surface	

Conformance with NACE MR0175/ISO 15156, Micrograph Images, Furnace Charts, Mill Cert, Micro Examination, Macro Examination, Magnetic Susceptibility, Grain Size 3.0, Forge Reduction 9:3:1

Treatments

Treatment performed on Batch

Heat Treating Method: Heatsink Thermocouple, Solution Annealed 1030 degC 2 Hours, Water Quench, Aged 780 degC 7 Hours, Air Cool

Standards

EN 10204:2004 Type 3.1



WTE PowerSteel s.r.o.
Pražská 449, 281 00 Kostelec n. Č. L.
IČ: 29147450 | DIČ: CZ29147450
Email: info@powersteel.eu



Certificate of Conformity

P015310 x P015311

Reg. Office: ATI Specialty Materials Ltd, President Way Works, President Way, Sheffield, S4 7UR
Sales direct line: +44 (0)114 2720081 Fax: +44 (0)114 266 1538
Reg in England No. 1919677 VAT Reg. Number 713857918

Document Number:	051810/0001	Revision: 2
Customer:	ENERGY STEEL LTD 88-90 HATTON GARDEN OFFICE 36, LONDON	

Customer Order Number	12001	Customer Item Number	1
Customer Part Number	R-718-00002485		
Material Grade	CP718	Melt Route	VIMVAR
Surface Condition	PEELED		
Heat Treatment Condition	SOLUTION TREATED & AGED		
Nominal Description	MACHINING BAR		
Diameter	120MM	Tolerance	(+2MM/-0)
Length	3 - 6 METRES	Tolerance	

Specification Details		
Specification	Issue	Comments
API 6A 71B	2 Errata 1	
API 6A PSL 3		Ultrasonic Standard
Release Requirements	EN10204.3.1, ISO 9001 Approval No. FM12276 NACE MR-01-75	

Cast	Identity	Diameter (mm)	Length (mm)	Weight (kg)
Z0234-3	T-1	120.1	3629	358
Z0234-3	T-3	120.1	5165	484

Comments
Amendment 10 Nov 2015 : Micro Test Position added.
Test Position of Micro Sample : 32mm from the as heat treated end.
Amended and re-issued 14/9/15, please note addition of NACE spec.

Attachments
Chemical Analysis: A288078 ,Test Report, Heat Treatment Charts, Ultrasonic Inspection Report, Photomicrographs

Certified that, unless stated hereon, the whole of the above-mentioned materials have been manufactured, tested and inspected in accordance with the contract/order applicable thereto and conform fully to the standards/specifications quoted hereon.

Digitally signed for and behalf of ATI Specialty Materials Ltd:

Stuart King
10 November 2015



Chemical Analysis

Document: 061810/0001 Rev: 2 Heat No: Z0234-3

Elements	Top Result:A288978
C	0.020
SI	0.04
MN	0.08
P	0.004
S	0.0005
CR	17.87
MO	2.99
NI	54.11
AL	0.57
B	0.0026
CO	0.09
CU	0.03
PB	<.0001
TI	0.98
BI	<.00001
CA	0.0001
MG	0.0006
SE	<.00005
FE	BAL
NB+TA	4.974



Test Report

Document: 061810/0001 Revision: 2 Heat No: Z0234-3

Heat Treatment					
Material	Operation	Temperature	Duration	Cooling	Furnace
Product	Solution Treated	1030°C	2 Hrs	Water Quenched	ATI No:6
Product	Aged	780°C	7 Hrs	Air Cooled	ATI No:7
Thermocouple			Heat Sink		
Heat Sink Diameter			2 x 130 mm		
Furnace Qualification and Equipment Calibration			API 6A Annex M		
Batch Reference			061605/0001		
Quench Temperature	Start	28.6 °C	Finish	36.3 °C	

Metallographic	
Macro Etch per API 6A 718 clause 4.2.1.1 and 4.2.1.2 at top and bottom positions. Canada Etch used. ASTM A604 Class 1-4 = A	Satisfactory

Microstructure	C	M/R	E
Grain Size ASTM E112	Average 3.0	Average 3.0	Average 3.5
Delta Phase	Fig 4 / D2	Fig 4 / D2	Fig 4 / D2
No laves phase, no acicular delta phase.			
The microstructure is free from continuous networks of secondary phase along grain boundaries or other unusual micro structural features, except for individual isolated grains that are not representative of the bulk of the microstructure.			
Duplex Grain Assessment ASTM E1181	No topological duplex grains.		

Non Destructive Tests	
Ultrasonic API 6A PSL 3	Satisfactory


Mechanical Properties								
Test No.	Test Direction /Position	Test Temp	Gauge Dia	Rp0.2%	Rm	Gauge Length	A%	Z%
				KSI	KSI			
28052	Longi Mid Radius	Room	12.7mm	132	183	4D	28	43
28052	Trans Mid Radial	Room	0.250"	131	174	4D	34	41

Product Hardness (HRC)	
Identity	Surface
T-1	38/39
T-3	38/37

Test Piece Hardness (HRC)	
Test No: 28052	36/36

Impact Tests						
Test No	Type	Test Direction/Position	Test Temp	J	Lateral Exp	Shear %
28052	Charpy 2mmV	Trans Mid Radial	-60°C	54/53/56	.018/.018/.018"	100/100/100%

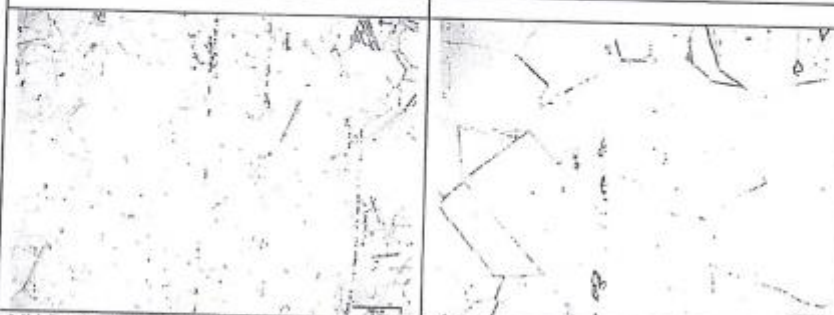
Others	
Ingot Size	16"
Forging Reduction	9.3:1
Hot Work Process	Rotary Forged ATI Sheffield
Heat Treatment Location	ATI Sheffield
Mech test performed from bar prolongation.(Length = 135mm)	
Material free from contamination with mercury and radioactive materials.	
No welding.	
Tested at ATI Specialty Materials Ltd. Commercial Testing Services.	

		MICRO EXAMINATION REPORT	
CTS NUMBER:	LIMS28052	DATE:	20/07/15
MATERIAL:	OP718	SAMPLE SIZE:	132mm DIA
CAST NUMBER:	Z0234-3	NOMINAL PRODUCT SIZE:	120.7mm DIA [+/- 1.5mm]
ETCHANT:	KALLINGS #2	TEST PIECE ID:	T-1
OPERATOR:	MT	BARS IN BATCH:	T-1/T-2/T-3/B-4



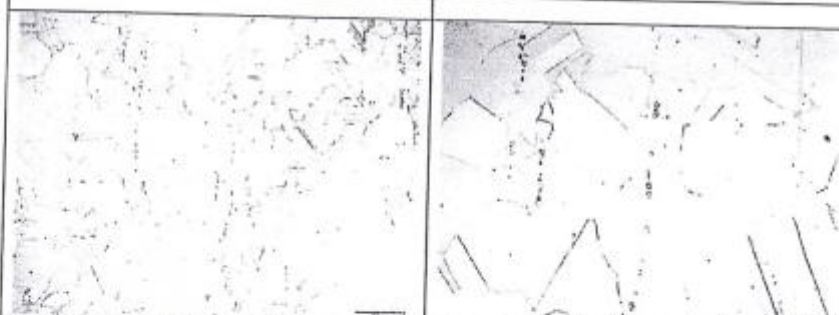
Edge Photograph taken at x100

Edge Photograph taken at x500



Mid-Radius Photograph taken at x100

Mid-Radius Photograph taken at x500



Centre Photograph taken at x100

Centre Photograph taken at x500




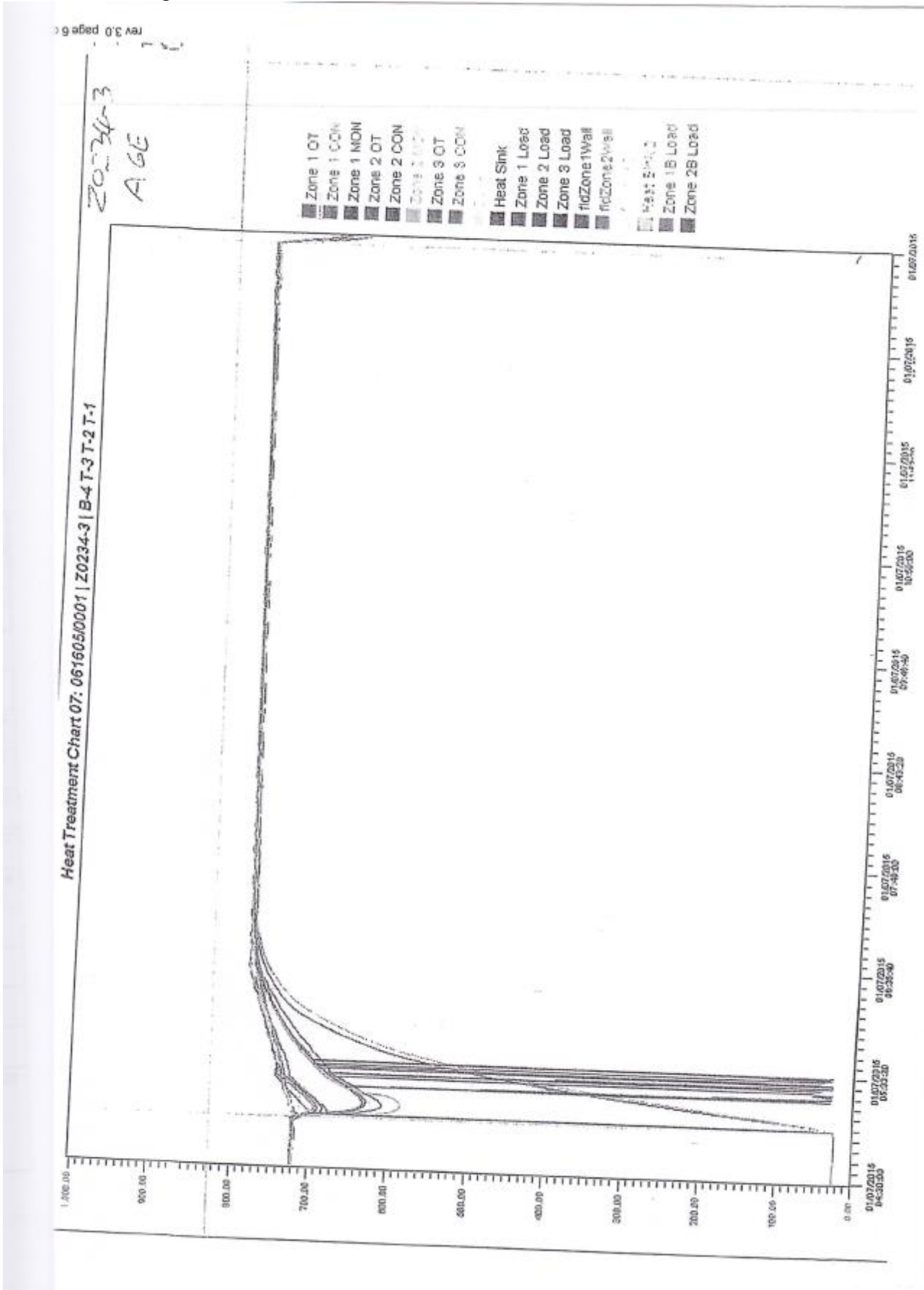
ATI Specialty Materials Ltd, President Way Works, President Way, Sheffield S4 7UR
Tel: +44 (0) 114 2720081
Fax: +44 (0) 114 2761556

ULTRASONIC EXAMINATION REPORT

QUALITY REX 718	MATERIAL TESTED MEETS THE FOLLOWING NDT SPECIFICATIONS API 6A PSL3/3G & PSL4	DESCRIPTION AS TESTED 120.7 mm \varnothing (-/+0.5mm)	
PRODUCTION STAGE SOLUTION TREATED & AGED		SURFACE CONDITION MACHINED	
CAST No. Z0234-3		BATCH SERIAL LETTERS	
DATE OF TEST 24/07/15	TESTED ON ORDER No. 061605	INST. TYPE AND No. GE USN60L S/N 13H00CGY	COUPLANT CELLULOSE PASTE

CALIBRATION RESULTS

SENSITIVITY COMPRESSION WAVE		3.2mm FBH DAC		Ref Std's ALLVAC 7 - 11 & OP718-1	TRANSFER/ ATTN +6dB
SENSITIVITY SHEAR WAVE		LONG - 2 - 3mm SH GRASS LEVEL CIRC - CIRC - 3% V NOTCH @ 80%SH			
PROBE TYPE	FREQUENCY	PROBE No.	CRYSTAL DIA.	SINGLE OR TWIN CRYSTAL	
GE B4SE 0°	4 MHz	57746	24mm	SINGLE	
GE SWS 45°	2.25 MHz	13101EW	0.5" X 1"	SINGLE	
BAR IDENTITY	LENGTH TESTED (mm)	RESULT			
T-1	3852	SATISFACTORY			
T-2	5244	SATISFACTORY			
T-3	5190	SATISFACTORY			
B-4	4558	SATISFACTORY			
(OPERATOR) SNT-TC-1A-LEVEL II L.MILLINGTON		EVALUATOR  DIGITALLY SIGNED BY THOMAS FLETCHER NASA30/EMK129 LEVEL 3, ASNT - 208135		PAGE 1 OF 1	



rev 3.0 page 6

